



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANTENAS DE PARCHE MULTIFRECUENCIA CARGADAS CON RESONADORES OCSRR

Autor: Isabel Cuadrado Gutiérrez

Tutor: Francisco Javier Herraiz Martínez

Leganés, mayo de 2014

AGRADECIMIENTOS

A Daniel Segovia Vargas por darme la oportunidad de realizar el proyecto en este departamento.

A Francisco Javier Herraiz Martínez por su dedicación al proyecto y ayudarme con todas las dudas que me iban surgiendo.

A mi familia, porque sin su apoyo y comprensión todos estos años, esto no habría sido posible, y en especial a Lorena por estar siempre ahí en todo momento.

A mis compañeros, que hacían que los momentos duros “viviendo en la universidad” fuesen más llevaderos.

Y a todos aquellos que me habéis tendido la mano cuando lo he necesitado.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto ha sido realizar el diseño, fabricación y medida de dos antenas de parche planas multifrecuencia de doble y triple banda respectivamente. Entre las ventajas de los parches destacan que son antenas muy ligeras y fáciles de fabricar e integrar en circuitería. Sin embargo, presentan ciertas desventajas como su complejidad a la hora de conseguir que funcionen en múltiples bandas. En este proyecto dicha respuesta multibanda se ha conseguido integrando partículas resonantes metamateriales OCSRRs (*Open Complementary Split Ring Resonators*) en la propia estructura del parche. De esta manera, se han conseguido antenas operativas para frecuencias próximas entre sí, escogidas arbitrariamente, en un único dispositivo plano y monocapa.

Como parte del trabajo efectuado, se han fabricado dos prototipos. El primero de ellos consiste en una antena de parche de doble banda que presenta un diagrama de radiación de tipo parche en cada una de sus bandas. Sin embargo, en el caso de la antena de parche en triple banda cabe destacar que combina diagramas de radiación de tipo parche y monopolar, lo que puede resultar de utilidad para algunos sistemas de comunicaciones.

Finalmente, los contenidos de la presente memoria se han organizado como se indica a continuación. En primer lugar, en el Capítulo 1, se introducen algunos conceptos relativos a los metamateriales y a las antenas de parche. A continuación, en el Capítulo 2, se presenta un estudio previo de la estructura de antena multibanda realizada en el que se combinan antenas de parche con un tipo de partículas metamateriales conocidas como OCSRRs (*Open Complementary Split Ring Resonators*). En tercer lugar, en los Capítulos 3 y 4 se presentan los principales resultados obtenidos con los dos tipos de antenas implementadas. Por último, en el Capítulo 5, se exponen las principales conclusiones del proyecto así como posibles líneas futuras del mismo.

Palabras clave: antenas de parche, metamateriales, partículas resonantes, multifrecuencia.

ABSTRACT

The goal of this project was to design, manufacture and measure two multifrequency planar patch antennas, with dual-band and tri-band response respectively. On the one hand, patch antennas have certain advantages. For instance, they are lightweight and easy to manufacture and integrate into circuits. On the other hand, they present some drawbacks such as the complexity to make them work in multiple bands. In this project such multiband response was achieved by integrating the so called OCSRR (*Open Complementary Split Ring Resonators*) metamaterial particles into the structure of the patch. In this way, operating antennas have been achieved for near frequencies, arbitrarily chosen, in a planar monolayer device.

As part of the work done, two prototypes were manufactured. The first one consists of a dual band patch antenna with patch-like radiation pattern in both bands. However, the triple band patch antenna combines patch-like and monopolar-like radiation patterns, which may be useful in some communication systems.

Finally, the contents of this memory are organized as follows. Firstly, in Chapter 1, some concepts of metamaterials and patch antennas are introduced. Then, in Chapter 2, a previous study of the structure of multi-band antenna on which patch antennas are combined with a type of metamaterial particles called OCSRRs (*Open Complementary Split Ring Resonators*) is presented. After this, in Chapters 3 and 4, the main results obtained with the two implemented antennas are presented. Finally, in Chapter 5, the main conclusions of the project and possible future lines are exposed.

Keywords: patch antennas, metamaterial particles, multifrequency.

GLOSARIO

CRLH	Composite right/left handed
CSRR	Complementary Split Ring Resonators
ENG	Epsilon-Negative
LH	Left-Handed
MNG	Mu-Negative
OCSRR	Open Complementary Split Ring Resonator
OSRR	Open Split Ring Resonators
PAN	Personal Area Network
RH	Right-Handed
SRR	Split-Ring Resonator
TW	Thin-Wire
WLAN	Wireless Local Area Network

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Introducción a los metamateriales	1
1.1.1	<i>Historia de los metamateriales</i>	2
1.2	Implementación basada en SRR y TW	3
1.2.1	<i>Estructura de hilos finos (TW)</i>	3
1.2.2	<i>Estructura de anillos cortados (SRR)</i>	4
1.2.3	<i>Implementación del medio LH</i>	5
1.3	Aproximación basada en líneas de transmisión CRLH	5
1.4	Aproximación de tipo resonante	8
1.5	Trabajos previos de antenas cargadas con resonadores de anillo	10
1.6	Antenas de Parche	12
1.7	Tipos de alimentación de los parches	14
1.8	Trabajos previos en parches de doble frecuencia con resonadores	16
2	ESTUDIO DE LA ANTENA DE PARCHES Y PARTÍCULAS OCSRRS	19
2.1	Descripción de la antena	19
2.2	Antena de parche cargada con dos OCSRRs	25
2.3	Antena de parche cargada con cuatro OCSRRs	34
2.4	Comparativa del parche convencional y cargado con OCSRR	41
3	ANTENA DE PARCHES CARGADA CON CUATRO OCSRR	44
3.1	Descripción de la antena	44
3.2	Modelo circuital equivalente	46
3.3	Resultados de simulación	48
3.4	Estudio paramétrico	57
3.5	Resultados Experimentales	59
4	ANTENA DE PARCHES CORTOCIRCUITADO CARGADA CON CUATRO OCSRRS	64
4.1	Descripción de la antena	64
4.2	Resultados de simulación	66
4.3	Estudio paramétrico	78
4.4	Resultados Experimentales	81
5	CONCLUSIONES	86
6	LÍNEAS FUTURAS	87
7	PRESUPUESTO	88
8	REFERENCIAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Clasificación de los materiales en función de sus parámetros constitutivos (ϵ, μ) [1]	1
Ilustración 2. Primera estructura LH bidimensional [5]	3
Ilustración 3. Representación de la permitividad en hilos finos en función de la frecuencia [6]	4
Ilustración 4. Representación de la permeabilidad en SRRs en función de la frecuencia [6]	5
Ilustración 5. Celda equivalente de un RH TL (a) y celda equivalente de un LH TL (b) [6]	5
Ilustración 6. Celda equivalente de un CRLH TL [6]	6
Ilustración 7. Diagrama de dispersión de un CRLH TL [6]	7
Ilustración 8. Diagrama de dispersión de un CRLH TL balanceado [6]	8
Ilustración 9. Línea microstrip LH cargada con SRRs y vías metálicas [6]	8
Ilustración 10. Circuito equivalente de la línea microstrip LH cargada con SRRs y vías metálicas [6]	9
Ilustración 11. Línea microstrip LH cargada con CSRRs y huecos serie [7]	9
Ilustración 12. Circuito equivalente línea microstrip cargada con CSRRs y huecos serie [7]	9
Ilustración 13. Dipolo cargado con OCSRRs [9]	11
Ilustración 14. Monopolo cargado con OCSRRs [2]	11
Ilustración 15. Corte lateral de un parche [7]	12
Ilustración 16. Formas posibles de un parche [7]	12
Ilustración 17. Diagrama de radiación de un parche con los cortes del plano E y el plano H [11]	13
Ilustración 18. Diagramas de radiación, a) diagrama de radiación omnidireccional, b) diagrama de radiación directivo típico de un parche [9]	14
Ilustración 19. Alimentación directa por línea microstrip por inserción en el parche [9]	15
Ilustración 20. Alimentación directa por conector coaxial [10]	15
Ilustración 21. Alimentación de un parche por proximidad [10]	16
Ilustración 22. Alimentación de un parche por apertura [10]	16
Ilustración 23. Parche con SRR e hilo metálico [12]	17
Ilustración 24. Diseño con partícula CSRR para obtener un parche funcionando en doble frecuencia [13]	18
Ilustración 25. Vista frontal del parche convencional	20
Ilustración 26. Corte lateral del parche convencional	20
Ilustración 27. Parámetro $ S_{11} $ para el parche diseñado que funciona a 2.45GHz	22
Ilustración 28. Diagrama de radiación del parche convencional a 2.45GHz	22
Ilustración 29. Diagrama de radiación en polares del parche convencional. Planos E y H a frecuencia 2.45GHz	23
Ilustración 30. Diagrama de radiación en polares del parche convencional plano E a frecuencia de 2.45GHz	23
Ilustración 31. Diagrama de radiación en polares del parche convencional plano H a frecuencia 2.45GHz	24
Ilustración 32. Distribución de campo eléctrico a frecuencia 2.45GHz	24
Ilustración 33. Distribución de corrientes a frecuencia 2.45GHz	25
Ilustración 34. Diseño OCSRR	25
Ilustración 35. Parche cargado con 2 OCSRRs	26
Ilustración 36. Parámetro $ S_{11} $ para la antena con 2 OCSRRs	28
Ilustración 37. Diagrama de radiación del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz	28
Ilustración 38. Diagrama de radiación en polares del parche planos E y H con OCSRRs en 2.33GHz	29
Ilustración 39. Diagrama de radiación en polares del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz plano E	29
Ilustración 40. Diagrama de radiación en polares del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz plano H	30
Ilustración 41. Distribución de corrientes en 2.33GHz	30
Ilustración 42. Distribución de campo Eléctrico en 2.33GHz	31
Ilustración 43. Diagrama de radiación del parche con 2 OCSRRs en 3.69GHz	31
Ilustración 44. Diagrama de radiación en polares del parche planos E y H con 2 OCSRRs en 3.69GHz	32

Ilustración 45. Diagrama de radiación en polares del parche con 2 OCSRRs en 3.69GHz plano E ...	32
Ilustración 46. Diagrama de radiación en polares del parche con 2 OCSRRs en 3.69GHz plano H ...	33
Ilustración 47. Distribución del campo eléctrico en 3.69GHz.....	33
Ilustración 48. Distribución de corrientes en 3.69GHz.....	34
Ilustración 49. Vista frontal del parche con 4 OCSRRs	34
Ilustración 50. Parámetro $ S_{11} $ para la antena con 4 OCSRRs	35
Ilustración 51. Diagrama de radiación del parche con 4 OCSRRs en 2.3GHz.....	36
Ilustración 52. Diagrama de radiación del parche en polares planos E y H con 4 OCSRRs en 2.3GHz	36
Ilustración 53. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.3GHz plano E	37
Ilustración 54. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.3GHz plano H	37
Ilustración 55. Distribución de corrientes en 2.3GHz.....	38
Ilustración 56. Distribución de campo Eléctrico en 2.3GHz.....	38
Ilustración 57. Diagrama de radiación del parche con 4 OCSRRs en 3.76GHz.....	39
Ilustración 58. Diagrama de radiación del parche en polares planos E y H con 4 OCSRRs en 3.76GHz	39
Ilustración 59. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 3.76GHz plano E	40
Ilustración 60. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 3.76GHz plano H....	40
Ilustración 61. Distribución del campo eléctrico en 3.76GHz.....	41
Ilustración 62. Distribución de corrientes en 3.76GHz.....	41
Ilustración 63. Comparativa del parámetro $ S_{11} $ para parche convencional, parche cargado con 2 OCSRRs y parche cargado con 4 OCSRRs.....	42
Ilustración 64. Diseño definitivo del parche con 4 OCSRRs.....	45
Ilustración 65. Diseño OCSRR	46
Ilustración 66. Modelo circuital equivalente del parche diseñado.....	47
Ilustración 67. Equivalencia de los elementos circuitales con las partes del parche	48
Ilustración 68. Parámetro s_{11} obtenido tras simular el modelo equivalente circuital.....	48
Ilustración 69. Parámetro $ S_{11} $ para el parche cargado con 4 OCSRRs	49
Ilustración 70. Diagrama de Radiación para la frecuencia 1.5GHz	50
Ilustración 71. Diagrama de radiación del parche en polares planos E y H con 4 OCSRRs en 1.5GHz	50
Ilustración 72. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 1.5GHz plano E	51
Ilustración 73. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 1.5GHz plano H	51
Ilustración 74. Distribución de corrientes para la frecuencia 1.5GHz	52
Ilustración 75. Distribución campo Eléctrico frecuencia 1.5GHz	52
Ilustración 76. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.77GHz	53
Ilustración 77. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz	53
Ilustración 78. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz	54
Ilustración 79. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz	54
Ilustración 80. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.77GHz	55
Ilustración 81. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.77GHz	55
Ilustración 82. Comparativa del parámetro $ S_{11} $ para el parche convencional y cargado con OCSRRs	56
Ilustración 83. Variación del parámetro $ S_{11} $ cambiando la longitud del parche externo	58
Ilustración 84. Variación del parámetro $ S_{11} $ cambiando la longitud de los OCSRRs	59
Ilustración 85. Parche fabricado.....	60
Ilustración 86. Parámetro $ S_{11} $ para los resultados simulados y experimentales del parche con 4 OCSRRs.....	60
Ilustración 87. Diagrama de radiación a frecuencia de 1.48GHz planos E y H	62
Ilustración 88. Diagrama de radiación a frecuencia de 2.5GHz planos E y H	62
Ilustración 89. Parche cargado con OCSRRs y cilindro en el centro para el cortocircuito	64
Ilustración 90. Diseño OCSRR	65
Ilustración 91. Parámetro $ S_{11} $ para el parche con 4 OCSRRs y un cortocircuito	66
Ilustración 92. Diagrama de Radiación para la frecuencia 1.49GHz	67
Ilustración 93. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 1.49GHz	68
Ilustración 94. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 1.49GHz plano E	68
Ilustración 95. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 1.49GHz plano H.....	69
Ilustración 96. Distribución de corrientes para la frecuencia 1.49GHz	70
Ilustración 97. Distribución campo Eléctrico frecuencia 1.49GHz	70
Ilustración 98. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.15GHz	71

Ilustración 99. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 2.15GHz	71
Ilustración 100. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.15GHz plano E	72
Ilustración 101. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.15GHz plano H.....	72
Ilustración 102. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.15GHz	73
Ilustración 103. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.15GHz	73
Ilustración 104. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.79GHz	74
Ilustración 105. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 2.79GHz	74
Ilustración 106. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.79GHz plano E	75
Ilustración 107. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.79GHz plano H.....	75
Ilustración 108. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.79GHz	76
Ilustración 109. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.79GHz	76
Ilustración 110. Comparativa entre el parche convencional, cargado con OCSRRs, cortocircuitado cargado con OCSRRs y con un parche en anillo	77
Ilustración 111. Variación del parámetro $ S_{11} $ moviendo la longitud del parche externo	79
Ilustración 112. Variación del parámetro $ S_{11} $ moviendo la longitud de los OCSRRs	80
Ilustración 113. Variación del parámetro $ S_{11} $ moviendo el radio del cortocircuito	81
Ilustración 114. Prototipo de la antena de parche cortocircuitada cargada con cuatro OCSRRs	82
Ilustración 115. Resultados experimentales del parámetro $ S_{11} $ para el parche cargado con 4OCSRRs	82
Ilustración 116. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenido de forma experimental a frecuencia de 1.48GHz.....	84
Ilustración 117. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenido de forma experimental a frecuencia de 1.78GHz.....	84
Ilustración 118. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenidos de forma experimental a frecuencia de 2.56GHz.....	85
Ilustración 119. Diagrama de Gantt del proyecto	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Medidas y materiales del diseño del parche.....	21
Tabla 2. Parámetros de diseño de los OCSRRs	26
Tabla 3. Medidas y materiales del diseño del parche.....	26
Tabla 4. Comparativa del parche convencional, con 2 OCSRRs y con 4 OCSRRs	42
Tabla 5. Medidas y materiales del diseño del parche.....	45
Tabla 6. Parámetros de diseño de los OCSRRs	46
Tabla 7. Comparativa del parche convencional y cargado con OCSRRs	56
Tabla 8. Resultados experimentales y teóricos del primer parche fabricado	61
Tabla 9. Medidas y materiales del diseño del parche.....	65
Tabla 10. Parámetros de diseño de los OCSRRs	66
Tabla 11. Tabla comparativa del parche convencional, el parche cargado con OCSRRs y el parche cortocircuitado cargado con OCSRRs.....	77
Tabla 12. Tabla comparativa de los resultados experimentales y teóricos del parche	83

1 INTRODUCCIÓN

La evolución experimentada por los sistemas inalámbricos durante los últimos años ha llevado a que la tendencia sea poder acceder con un único terminal de comunicaciones a distintos servicios simultáneamente. Además se requiere que estos terminales sean compactos, para lo cual sería deseable el uso de una única antena para cubrir todos los servicios en los que funcione el terminal. De esta forma, la mejor solución para los terminales de usuario es emplear como elementos radiantes antenas compactas con propiedades de multifrecuencia. Para lograr que este tipo de antenas funcionen simultáneamente en varias bandas de frecuencia se han empleado nuevas técnicas como, por ejemplo, la basada en estructuras metamateriales [1].

Durante los últimos años se han presentado diferentes antenas multifrecuencia basadas en metamateriales. Recientemente se han investigado unas nuevas partículas metamateriales llamadas OCSRRs (Open Complementary Split Ring Resonator), con las que se ha conseguido mayor ancho de banda en antenas de tipo dipolo o monopolo [2]. Por estos motivos, el objetivo de este proyecto va a ser conseguir antenas de parche multifrecuencia empleando estas nuevas estructuras metamateriales con las que se consigue mayor ancho de banda que con otros resonadores, consiguiendo diagramas de radiación de tipo parche y monopolar.

1.1 Introducción a los metamateriales

Los metamateriales son medios electromagnéticos artificiales que en determinadas frecuencias presentan propiedades inusuales que no se encuentran comúnmente en la naturaleza. Otra característica propia de los metamateriales es que son estructuras homogéneas, lo cual implica que el tamaño de las estructuras que componen los metamateriales tendrá que ser mucho más pequeño que el de la longitud de onda guiada.

Los parámetros constitutivos de un material son la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética (ϵ, μ) del mismo, cuya relación define el índice de refracción de un medio según la expresión

$$n = \pm \sqrt{\epsilon \cdot \mu}.$$

De este modo, dependiendo del valor de ϵ, μ podemos clasificar a los materiales en cuatro grandes grupos:

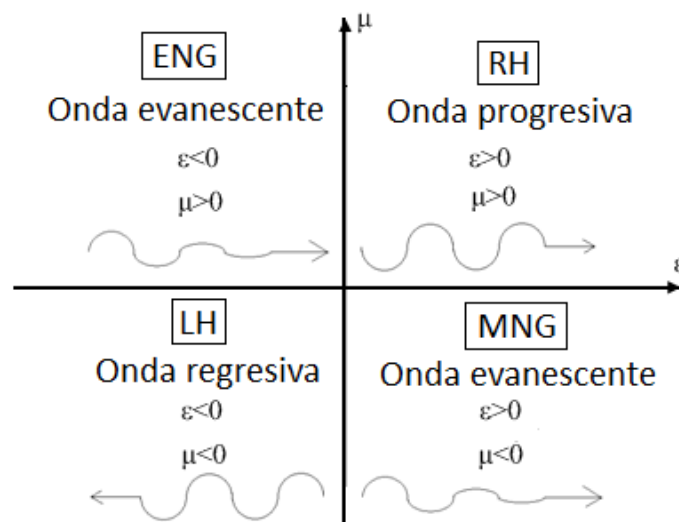


Ilustración 1. Clasificación de los materiales en función de sus parámetros constitutivos (ϵ, μ) [1]

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

- Materiales RH (Right-Handed): con sus dos parámetros constitutivos positivos ($\epsilon > 0, \mu > 0$) denominados así porque permiten la propagación de ondas electromagnéticas progresivas, siendo los vectores de campo eléctrico (E) y de inducción magnética (H) ortogonales entre sí y a su vez ortogonales a la dirección de propagación, siguiendo la regla de la mano derecha.
- Materiales LH (Left-Handed): con sus dos parámetros constitutivos negativos ($\epsilon < 0, \mu < 0$) denominados así porque permiten la propagación de ondas electromagnéticas regresivas, siendo los vectores de campo eléctrico (E) y de inducción magnética (H) ortogonales entre sí y a su vez ortogonales a la dirección de propagación, siguiendo la regla de la mano izquierda.
- Materiales ENG (Epsilon-Negative): tienen permitividad negativa y permeabilidad positiva ($\epsilon < 0, \mu > 0$) y no es posible la propagación de ondas electromagnéticas admitiendo únicamente modos evanescentes.
- Materiales MNG (Mu-Negative): tienen permitividad positiva y permeabilidad negativa ($\epsilon > 0, \mu < 0$) y no es posible la propagación de ondas electromagnéticas admitiendo únicamente modos evanescentes.

Los materiales RH son los únicos cuya velocidad de fase y de grupo son paralelas y cuyo índice de refracción es positivo, siendo así los únicos que permiten propagación de ondas electromagnéticas progresivas.

Podemos ver que los materiales ENG y MNG al tener uno de sus parámetros constitutivos de signo negativo sólo admiten modos evanescentes. Este hecho hace además que sea imposible la propagación en el medio ya que su índice de refracción y su constante de propagación son complejas.

Por último observando los materiales LH vemos que ambos parámetros constitutivos son negativos permitiendo este hecho la propagación de ondas regresivas ya que su índice de refracción es negativo y su velocidad de grupo y de fase son antiparalelas. Así, vamos a referirnos en concreto con el término metamateriales al conjunto de dispositivos cuyos parámetros constitutivos, permitividad y permeabilidad (ϵ, μ) sean negativos simultáneamente.

1.1.1 Historia de los metamateriales

La existencia de los materiales LH fue propuesta en 1967 por el físico ruso Víctor Veselago, que introdujo el concepto de metamaterial en un artículo donde predijo algunas de sus principales propiedades. Algunas de las principales características que destacaba en su artículo eran tales como el efecto Doppler inverso, la inversión de la ley de Snell (como consecuencia de la aparición del índice de refracción del medio con signo negativo), la radiación inversa de Vavilov-Cerenkov, inversión de las condiciones de contorno para las componentes normales del campo eléctrico y magnético en la interfaz entre el medio RH y LH, transformación de un punto fuente en un punto imagen e intercambio de los efectos de convergencia y divergencia en lentes LH convexas y cóncavas. [3]

A pesar de introducir este nuevo concepto de metamateriales no fue hasta unos 30 años después del trabajo de Veselago cuando se comprobó de forma experimental construyendo los primeros prototipos basados en este tipo de estructuras. Estos prototipos se basaron en las estructuras de John Brian Pendry, quién implementó las primeras estructuras ENG basadas en hilos finos (TW Thin-Wire) y MNG basadas en anillos resonantes cortados (SRR Split-Ring Resonator) en el rango de las microondas. Combinando las dos estructuras propuestas por Pendry, David R. Smith y su grupo de la Universidad de California desarrollaron la primera estructura de metamateriales LH. Se concluyó que en el rango de frecuencias bajo estudio dicha estructura tenía una banda de paso que presentaba parámetros constitutivos negativos simultáneamente. En la ilustración 2 se muestra esta primera estructura de metamateriales.[4]

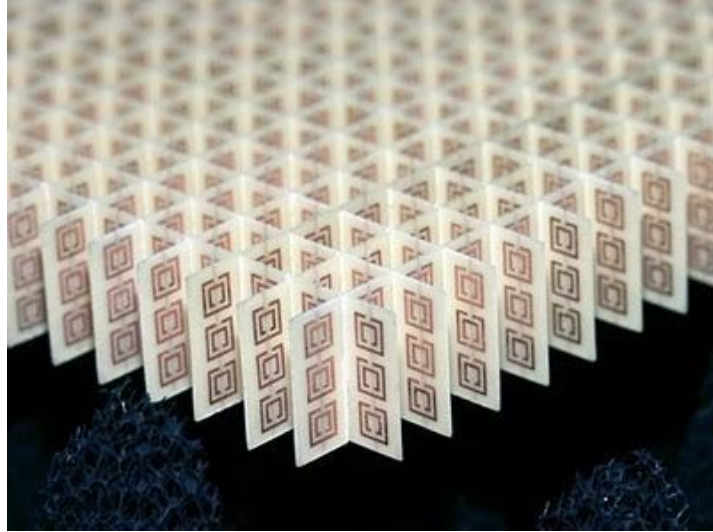


Ilustración 2. Primera estructura LH bidimensional [5]

1.2 Implementación basada en SRR y TW

En este apartado se va a explicar cómo funcionan los TW y los SRR para comprender cómo de la unión de estos dos elementos se obtiene una estructura con comportamiento LH tal y cómo comprobaron Smith y su grupo de forma experimental.

1.2.1 Estructura de hilos finos (TW)

Las estructuras de hilos finos se comportan como un material ENG. Si la excitación de campo eléctrico es paralela al eje de los hilos, la permitividad en función de la frecuencia viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

Donde la frecuencia de plasma viene dada por:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{p^2 \ln\left(\frac{p}{r}\right)}}$$

Siendo c la velocidad de la luz, p el periodo y r el radio de los hilos.

En la ilustración 3 podemos ver como la permitividad es negativa por debajo de la frecuencia de plasma. Se han asumido hilos teóricamente infinitos lo que significa que son excitados a frecuencias muy por debajo de su frecuencia de resonancia.

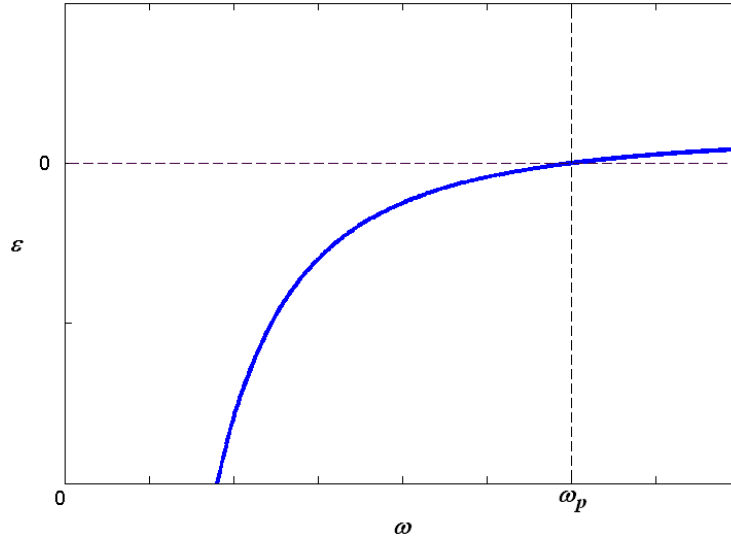


Ilustración 3. Representación de la permitividad en hilos finos en función de la frecuencia [6]

1.2.2 Estructura de anillos cortados (SRR)

La estructura SRR se comporta como un material MNG y consiste en dos anillos metálicos concéntricos cortados. Si la excitación de campo magnético es perpendicular al plano de los anillos, la permeabilidad en función de la frecuencia viene dada según la siguiente expresión:

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

donde $F = \pi(r_{in}/p)^2$, siendo r_{in} el radio interno del anillo más pequeño, p el periodo y ω_0

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln\left(\frac{2w}{g} r_{in}^3\right)}}$$

Siendo w el ancho de los anillos y g la separación entre los anillos. En este caso la permeabilidad magnética será negativa cuando $\omega_0 < \omega < \omega_{pm}$ con $\omega_{pm} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-F}}$, en la siguiente figura podemos ver representado este hecho:

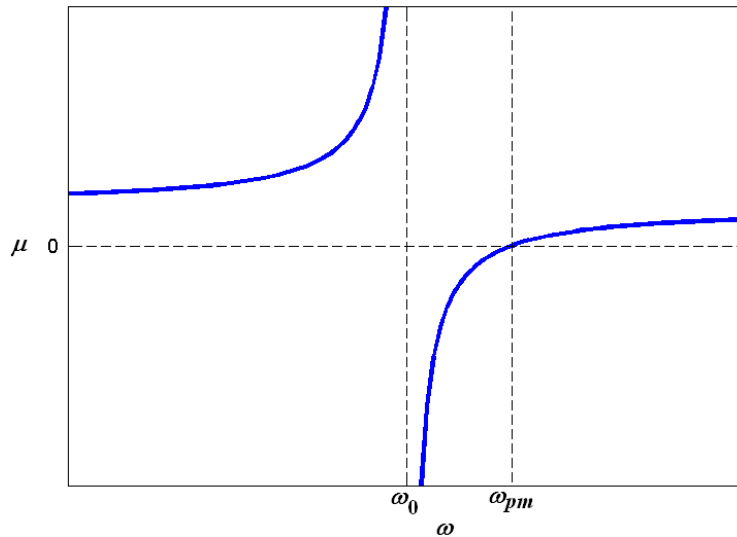


Ilustración 4. Representación de la permeabilidad en SRRs en función de la frecuencia [6]

1.2.3 Implementación del medio LH

Podemos lograr estructuras LH a partir de la unión de una estructura MNG y ENG, tal como hizo Smith y su grupo. Para conseguir un medio con los parámetros constitutivos negativos simultáneamente la frecuencia de plasma de los hilos debe ser mayor que la frecuencia de plasma magnética de los SRRs ($\omega_p > \omega_{pm}$). De la unión de ambas estructuras se observa una banda de paso en la banda de frecuencias en las que los hilos finos tienen un comportamiento ENG y los SRRs presentan un comportamiento MNG simultáneamente.

1.3 Aproximación basada en líneas de transmisión CRLH

Las líneas de transmisión LH permiten la propagación de ondas regresivas. Una línea de transmisión LH se puede obtener como el dual de una RH.

Una línea de transmisión RH se puede modelar como la concatenación de celdas compuestas por inductancias en serie y capacidades en paralelo. De igual forma la estructura dual a ésta será la línea de transmisión LH formada por la unión de celdas con capacidades serie e inductancias paralelo. En la ilustración 5 podemos observar la representación de ambas celdas.

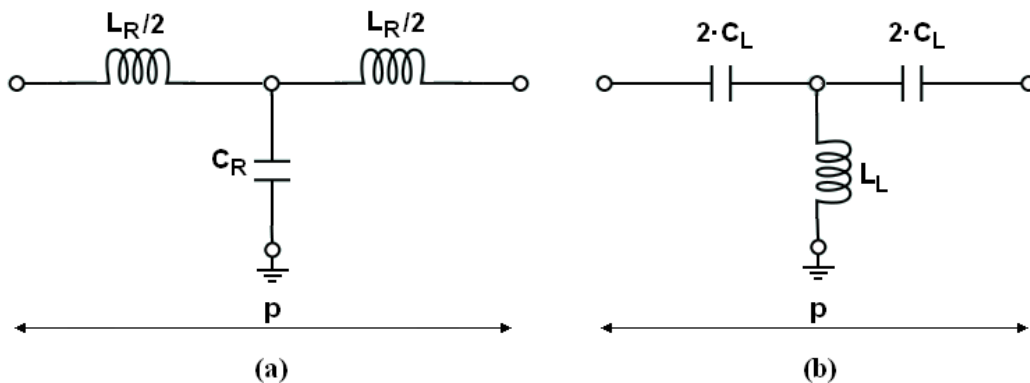


Ilustración 5. Celda equivalente de un RH TL (a) y celda equivalente de un LH TL (b) [6]

Del análisis de las características de propagación de las líneas de transmisión obtenemos las siguientes expresiones:

$$\beta_{RH} = \frac{1}{p} \cos^{-1} \left[1 - \frac{L_R C_R}{2} \omega^2 \right]$$

$$Z_{RH} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{cRH}^2} \right)}$$

$$\beta_{LH} = \frac{1}{p} \cos^{-1} \left[1 - \frac{1}{2L_L C_L \omega^2} \right]$$

$$Z_{LH} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L} \left(1 - \frac{\omega_{cLH}^2}{\omega^2} \right)}$$

Donde $\omega_{cRH} = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ y $\omega_{cLH} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$, siendo β la constante de fase, Z la impedancia característica y $\omega_{cRH}, \omega_{cLH}$ las frecuencias de corte de RH y LH TLs. En vista de las expresiones RH TL es una estructura paso bajo y LH TL una paso alto.

No es posible implementar líneas de transmisión LH puras, ya que en las implementaciones con líneas de transmisión LH en diferentes tecnologías aparecen los efectos parásitos de líneas RH y LH. Por ello la mejor aproximación de las líneas de transmisión LH son las denominadas líneas de transmisión compuesta diestras/zurdas o CRLH (Composite Right Left Handed). En estas líneas CRLH se tienen en cuenta los efectos parásitos haciendo así que la implementación física sea como se muestra en la Ilustración 6. En la siguiente figura se puede ver el circuito equivalente de los CRLH y a continuación se muestra el valor de la constante de fase y la impedancia característica:

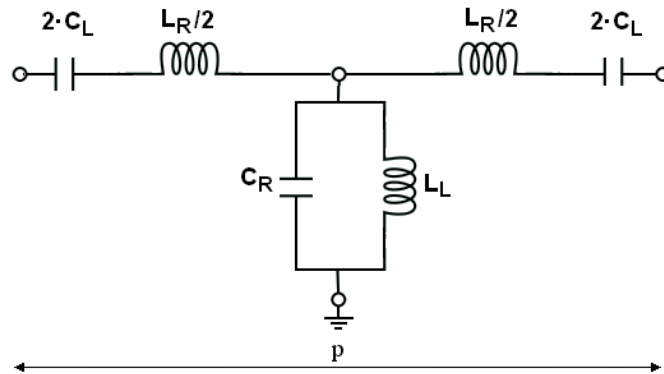


Ilustración 6. Celda equivalente de un CRLH TL [6]

$$Z_{CRLH} = Z_{LH} \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_{se}} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\omega}{\omega_{sh}} \right)^2 - 1}}$$

$$\beta = \frac{1}{p} \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{\omega_R^2} + \left(\frac{\omega_L^2}{\omega_{se}^2} + \frac{\omega_L^2}{\omega_{sh}^2} \right) \right] \right\}$$

donde

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}}$$

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}}$$

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}$$

En la Ilustración 7 se muestra el diagrama de dispersión de las líneas CRLH. Como puede notarse se distinguen tres zonas diferenciadas de funcionamiento: en la zona de más baja frecuencia domina el comportamiento LH y la propagación es regresiva, la banda de corte en la que no se produce propagación, ocurre entre las dos frecuencias de corte y por encima de la banda de corte domina el comportamiento RH con propagación progresiva.

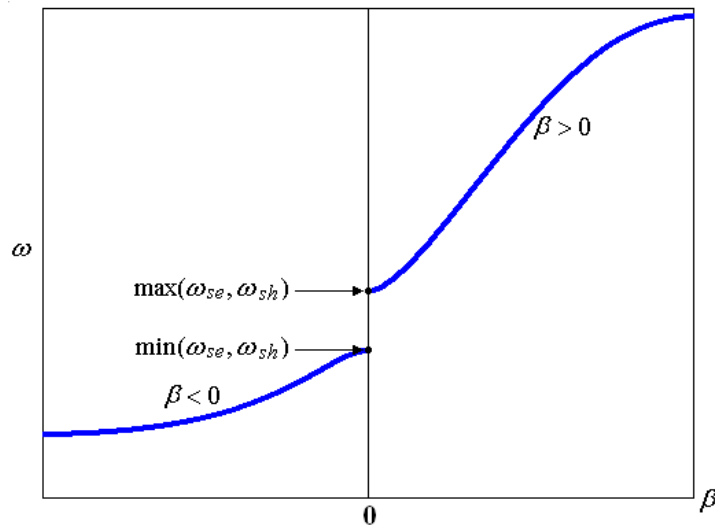


Ilustración 7. Diagrama de dispersión de un CRLH TL [6]

Un caso particular de este tipo de líneas es el denominado balanceado que tiene lugar cuando las resonancias serie y paralelas son idénticas, es decir $\omega_{sh} = \omega_{se} = \omega_0$. En la Ilustración 8 puede verse reflejado este hecho:

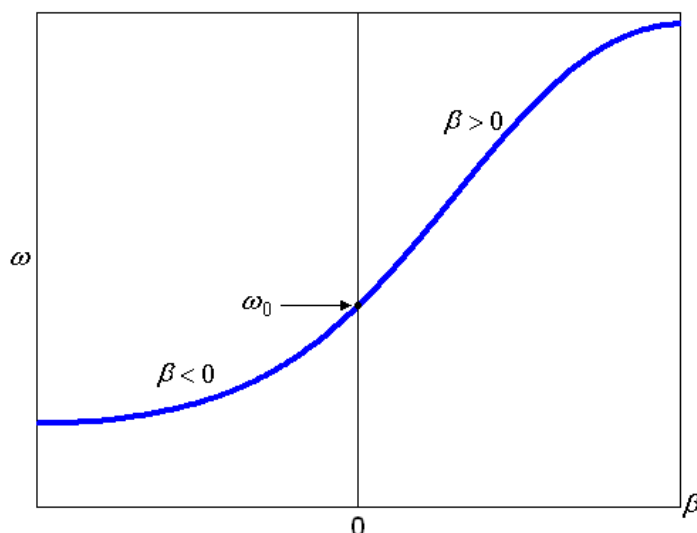


Ilustración 8. Diagrama de dispersión de un CRLH TL balanceado [6]

1.4 Aproximación de tipo resonante

Una implementación de las líneas de transmisión metamateriales es la llamada de tipo resonante, denominada así porque las líneas son cargadas con resonadores como por ejemplo los SRRs. Cabe destacar que es necesario buscar alternativas a los circuitos LC en tecnología impresa dada la dificultad de fabricación que conllevan estos últimos, buscando por ello como alternativa partículas resonantes como las que se presentan, que son equivalentes a bobinas y condensadores en paralelo. En la Ilustración 9 se puede ver un ejemplo de este tipo de estructuras implementado con líneas microstrip en las que el efecto de las inductancias en paralelo se logra con unas vías metálicas conectadas al plano de masa.

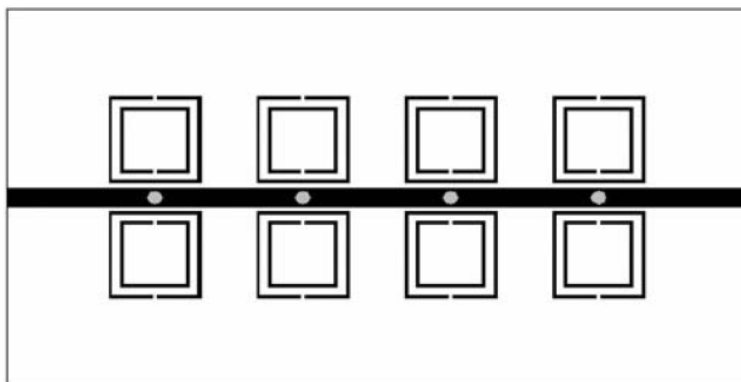


Ilustración 9. Línea microstrip LH cargada con SRRs y vías metálicas [6]

El circuito equivalente de esta estructura se muestra en la Ilustración 10. Como puede verse está compuesto por la consecución de bobinas y condensadores dispuestos en serie y paralelo.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

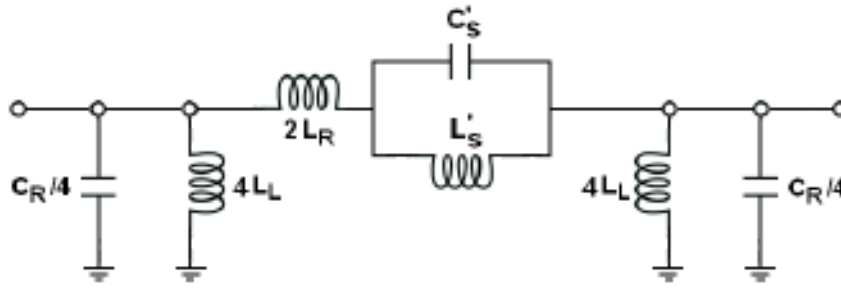


Ilustración 10. Circuito equivalente de la línea microstrip LH cargada con SRRs y vías metálicas[6]

Los desarrolladores de esta aproximación también propusieron el concepto de partículas complementarias como una alternativa para diseñar estructuras basadas en elementos resonantes. El complementario de una estructura planar metálica se obtiene reemplazando las partes de metal de la estructura original por huecos y los huecos por metal (principio de dualidad).

Al igual que para la estructura anterior, para lograr una línea de transmisión cargada con partículas complementarias (los complementarios a los SRRs se les denomina CSRRs) y con banda LH necesitamos añadir unos huecos, que se comportan como una capacidad serie, a las tiras.

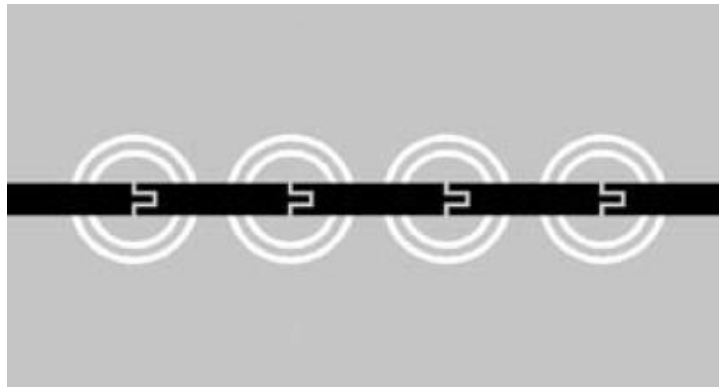


Ilustración 11. Línea microstrip LH cargada con CSRRs y huecos serie [7]

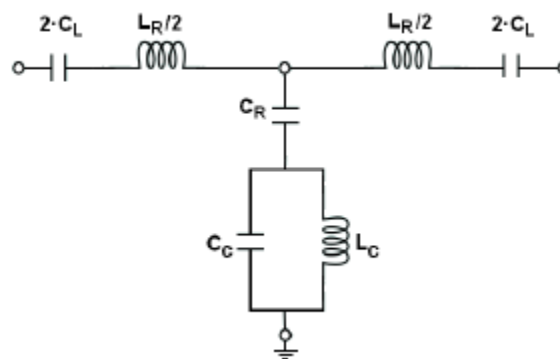


Ilustración 12. Circuito equivalente línea microstrip cargada con CSRRs y huecos serie[7]

Esta estructura tiene un comportamiento igual que el de su complementaria, presentando un comportamiento similar al de una línea de transmisión CRLH.

En un principio hubo discusiones sobre si era posible implementar líneas de transmisión CRLH balanceada con la aproximación resonante. Los desarrolladores demostraron la posibilidad de llevarlo a cabo con modelos como los mostrados en las figuras anteriores (Ilustración 9 y 11).

A raíz de las partículas resonantes planares que se emplearon en estos modelos (SRR y su complementaria CSRR), se derivaron los resonadores abiertos. Los resonadores abiertos se caracterizan por necesitar dos terminales que estén directamente conectados al resonador para permitir su excitación. [8] En concreto para este proyecto nos interesa hablar del OCSRR que es el complementario del CSRR. El OCSRR tiene como circuito equivalente un tanque paralelo de una bobina y un condensador; el valor del condensador se corresponde aproximadamente con el valor del condensador de un CSRR, y el valor de su inductancia es cuatro veces mayor que la inductancia del CSRR de sus mismas dimensiones. Este hecho es el que hace que la frecuencia de resonancia de los OCSRRs sea la mitad que la de los CSRRs de las mismas dimensiones y empleando el mismo sustrato. [8]

Estas partículas serán las empleadas en este proyecto para conseguir antenas de parche en multifrecuencia, hecho que sólo se ha probado en dipolos y monopolos. [2]-[9]

1.5 Trabajos previos de antenas cargadas con resonadores de anillo

Como se comentó en la introducción, los sistemas de comunicaciones inalámbricas han crecido considerablemente durante los últimos años. La tendencia actual es la de integrar varios servicios en un único terminal móvil. Para que no haya distorsión a causa de las interferencias entre distintos servicios necesitaríamos filtros muy selectivos en frecuencia. Sin embargo, si conseguimos que nuestra antena tenga un alto aislamiento de las frecuencias logramos grandes simplificaciones. Por este motivo los objetivos que se quieren conseguir son antenas multifrecuencia para frecuencias cercanas con un tamaño lo más reducido posible.

En las antenas de parche microstrip la mejor forma de conseguir multifrecuencia es añadiendo elementos resonantes a diferentes frecuencias. Una de las posibilidades es añadir células LH con permitividad y permeabilidad simultáneamente negativas. Algunos trabajos previos ya lograron antenas multifrecuencia empleando estas partículas en dipolos. Sin embargo, había un límite para conseguir el funcionamiento en frecuencias bastante cercanas [9]. Por este motivo se realizó el estudio empleando antenas de parche con SRRs que permiten obtener multifrecuencia sin aumentar el tamaño de la antena y sin emplear puertos ortogonales como se había hecho hasta ahora [10]. El número de frecuencias de trabajo se puede elegir en función del número de SRRs empleados, de este modo estas antenas exhiben dos o más bandas de frecuencias, la primera viene dada por la antena impresa, las otras vienen dadas por los elementos de carga empleados. Tras el estudio se lograron ratios de frecuencia cercanos a uno.

Sin embargo, tras los estudios anteriores se comprobó que el empleo de las partículas SRR lleva a anchos de banda estrechos por debajo del 5% que pueden no ser útiles para la mayoría de las aplicaciones. Este hecho se debía a un alto valor del factor Q en las parejas de partículas magnéticas resonantes. Recientemente se ha comprobado que los anillos abiertos complementarios (OCSRR) se pueden emplear para realizar aplicaciones en banda ancha. Uno de los estudios realizado se llevó a cabo con dipolos cargados con OCSRRs y se comprobó que el ancho de banda era mayor del 5% obtenido con sus partículas complementarias [9].

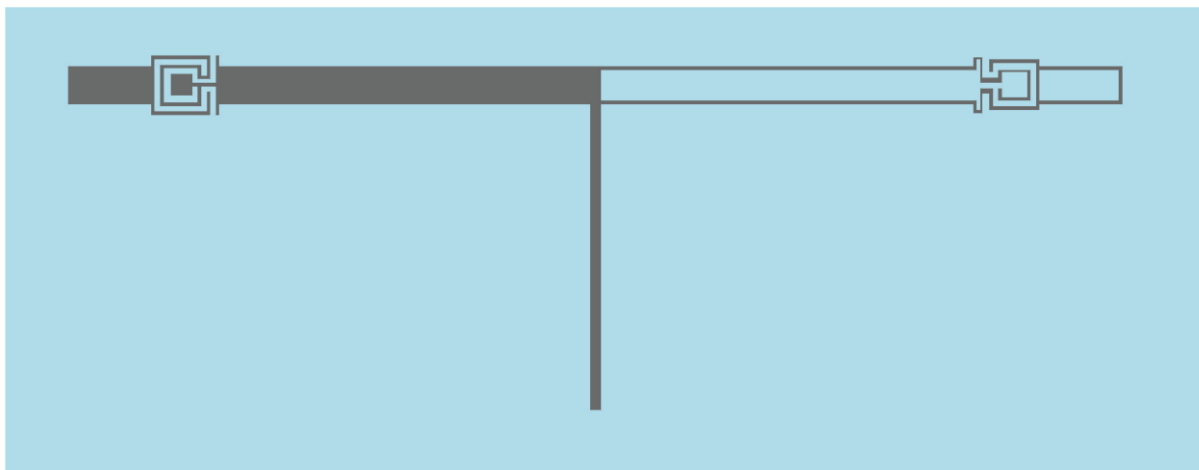


Ilustración 13. Dipolo cargado con OCSRRs[9]

Otra implementación llevada a cabo fueron los monopolos cargados con estas nuevas partículas OCSRRs obteniendo al igual que en el caso de los dipolos buenos resultados [2]. Se pueden conseguir dos o más frecuencias de funcionamiento con mejor ancho de banda que con los SRRs ya que estas partículas presentan un factor de calidad menor, y empleando sólo elementos planares se obtienen antenas de dimensiones muy pequeñas y de bajo coste que pueden ser interesantes de emplear para modems PAN o WLAN por ejemplo.

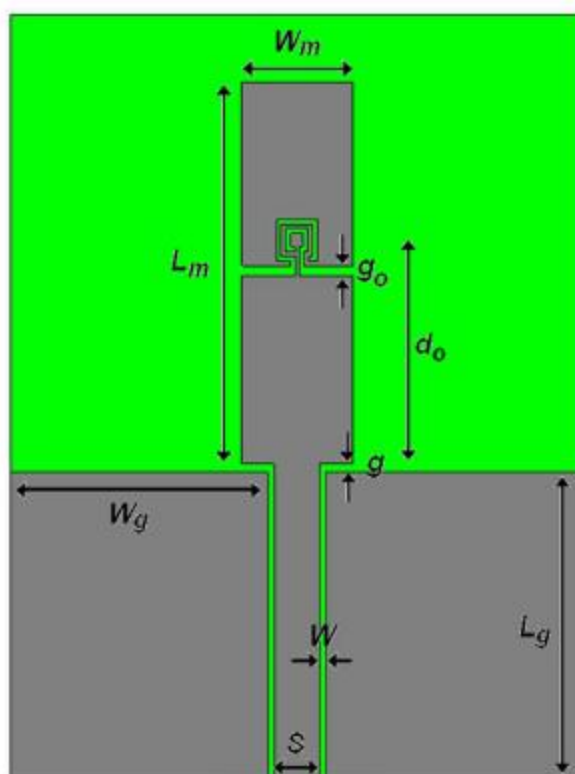


Ilustración 14. Monopolo cargado con OCSRRs[2]

En el presente proyecto se va a investigar el uso de OCSRRs en antenas planas de tipo parche para conseguir funcionamiento multibanda con anchos de banda mayores a los que se han presentado en la literatura, basados en SRRs.

1.6 Antenas de Parche

En este apartado se va a describir el funcionamiento de las antenas empleadas para los diseños llevados a cabo en el presente proyecto. De este modo se definirá qué es una antena de parche, cuáles son sus ventajas y sus características en cuanto a ancho de banda, diagrama de radiación y funcionamiento multifrecuencia. Por último se comentarán los tipos de alimentación que pueden emplearse en las antenas de parche y se expondrán los métodos empleados hasta el momento para conseguir multifrecuencia.

La antena que se va a emplear para los diseños debe ser un parche microstrip (denominados así por estar basados en esta tecnología). Este tipo de antena tiene una estructura plana, por lo que aporta ventajas como son la reducción de peso y tamaño del diseño, fáciles de adaptar en circuitos integrados, facilidad de fabricación y bajo coste. Este conjunto de características hace que sean interesantes para las comunicaciones inalámbricas.

Una antena impresa consiste en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico. El parche puede tener diversas geometrías (Ilustración 12), puede ser cuadrado, rectangular, circular, geometría en anillo, pero lo más habitual es que el parche tenga geometría rectangular o circular y que sus dimensiones (d en la Ilustración 15) sean del orden de media longitud de onda. [7]

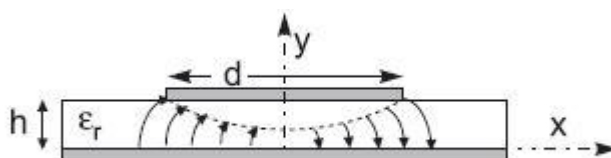


Ilustración 15. Corte lateral de un parche [7]

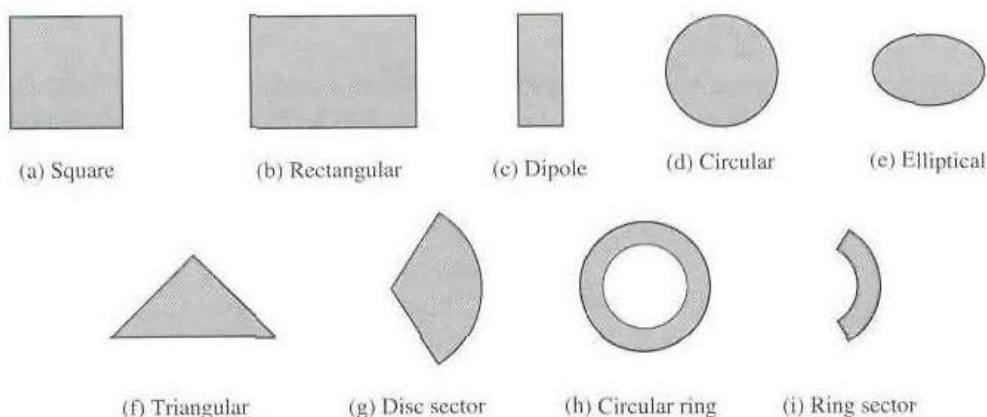


Ilustración 16. Formas posibles de un parche [7]

Para la fabricación de antenas microstrip es posible emplear diversos sustratos, aunque son preferibles los sustratos con espesores grandes ($0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) y ϵ_r pequeñas (cercas a 2.2), dado que así se consigue mejor eficiencia, mayor ancho de banda y mayor campo de desbordamiento.

Entre los parámetros característicos de una antena de parche se van a explicar con detenimiento el diagrama de radiación y el ancho de banda relativo dado que van a ser fundamentales en el estudio

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

de los diseños implementados posteriormente por lo que hay que tener claro en qué consisten para comprender mejor los resultados obtenidos.

-Diagrama de radiación:

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena manteniendo constante la distancia [11]. En el caso del parche, para su modo fundamental, el tipo de radiación es de tipo broadside que es un diagrama perpendicular al plano de masa del parche (si el parche estuviese situado en el eje XY el diagrama de radiación tendría su máximo en el eje Z). En un parche ideal (plano de masa infinito) sólo hay radiación hacia fuera del parche no produciéndose radiación en la parte inferior. En la realidad sí aparece radiación en forma de lóbulos secundarios, mucho menores a la potencia radiada en el punto de máxima radiación, por lo que pueden ser despreciados.

El diagrama de radiación suele representarse en tres dimensiones pero también suele representarse los cortes de los planos E y H, por ello se explica a continuación cómo se realizan estos cortes.

En la siguiente imagen podemos ver un diagrama de radiación correspondiente a una antena directiva que tiene forma de pincel, el parche en este caso estaría situado detrás en perpendicular. Se puede ver además cómo vienen realizados los cortes en plano E y H.

El plano E es el que forman la dirección de máxima radiación y el vector campo eléctrico en dicha dirección. El Plano H contiene la dirección de máxima radiación y el vector campo magnético en dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena [11].

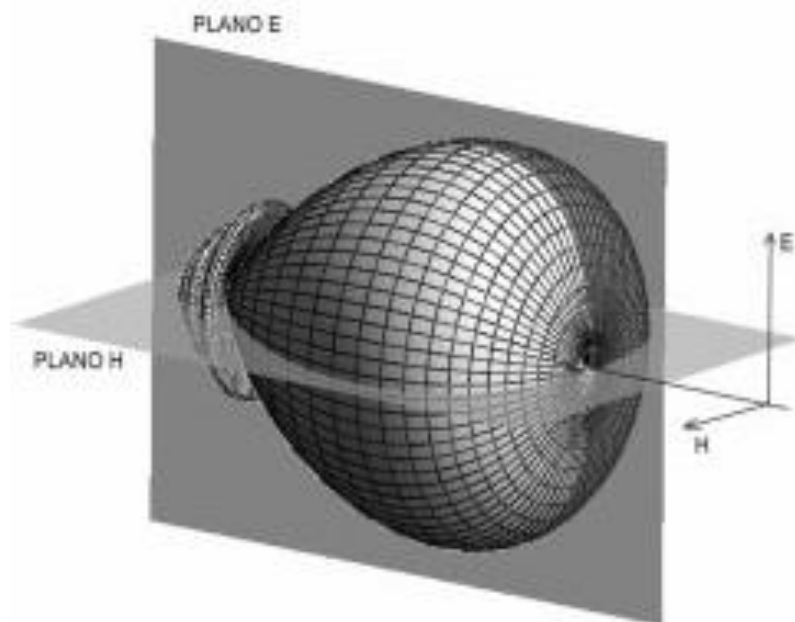


Ilustración 17. Diagrama de radiación de un parche con los cortes del plano E y el plano H [11].

En los diseños obtenidos en este estudio cabe destacar que se van a obtener dos tipos de radiación cuyos diagramas se muestran en la siguiente figura. El primero de ellos es un diagrama omnidireccional, y se denomina así a los diagramas que presentan una simetría entorno a un eje. Este tipo de radiación se obtendrá al introducir un cortocircuito en nuestra antena uniendo con metal el parche al plano de masa por un hilo conductor lo que provocará que haya un nulo de radiación donde antes se tenía un máximo y radiación uniforme en forma de toroide. Esto se conseguirá a una frecuencia determinada como bien se explicará más adelante. La segunda representación como ya se

ha comentado, se corresponde con un diagrama broadside y es el típico de un parche convencional como ya se ha comentado.

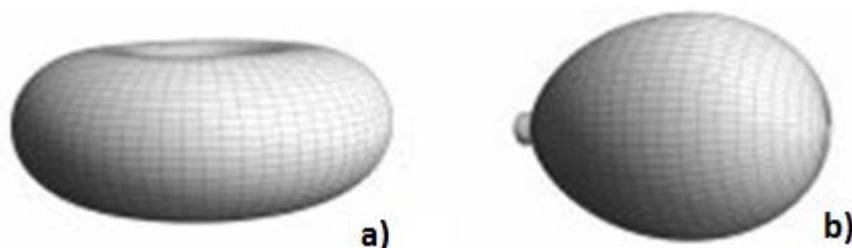


Ilustración 18. Diagramas de radiación, a) diagrama de radiación omnidireccional, b) diagrama de radiación directivo típico de un parche [9].

-Ancho de banda:

Todas las antenas están limitadas a trabajar en un margen de frecuencias debido a su geometría finita. El ancho de banda de la antena es por tanto el margen de frecuencias que cumplen unas características concretas. De este modo el ancho de banda relativo de la antena para una frecuencia determinada, parámetro del que se hablará mucho en este estudio, se define como la relación entre el margen de frecuencias en el que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central y se suele expresar en forma de porcentaje tal y como muestra la siguiente expresión:

$$BW = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0}$$

Para obtener mejor ancho de banda se debe optar por un ancho de sustrato grande y una constante dieléctrica lo más pequeña posible.

1.7 Tipos de alimentación de los parches

Para que una antena de parche funcione de forma correcta, debe ser alimentada con estructuras eficientes, y debe elegirse el tipo de alimentación más adecuado a cada diseño y ajustar las dimensiones y posiciones del mismo para que la antena funcione de forma correcta y deseada a determinadas frecuencias.

Existen diversos métodos de alimentación que pueden ser clasificados en tres grupos: alimentación directa, por proximidad y por apertura.

- Alimentación directa: este tipo de alimentación implica un contacto directo entre la propia antena y la estructura encargada de la alimentación. Dentro de este tipo de alimentación nos encontramos con dos tipos: la alimentación por líneas microstrip y la alimentación por conector coaxial.

La alimentación por líneas microstrip consiste en poner una línea directamente conectada al parche, podemos tener dos tipos, que dicha línea esté conectada al borde del parche por lo que el acoplamiento de la impedancia vendrá determinado por la posición de la línea respecto al parche, o que dicha línea se inserte en el parche en cuyo caso la profundidad de la inserción determinará una mejor o peor adaptación. En la siguiente imagen se representa ambas la situación en la que la línea se encuentra insertada en el parche:

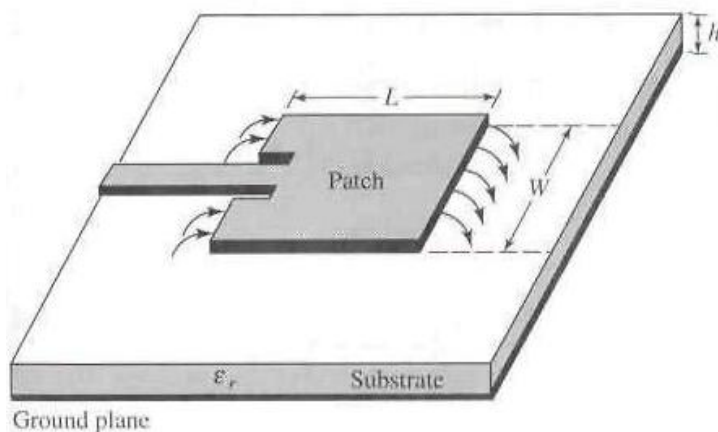


Ilustración 19. Alimentación directa por línea microstrip por insercción en el parche [9]

Este es el método más sencillo de emplear pero presenta mala eficiencia en cuanto al ancho de banda y acoplamiento se refiere.

La alimentación por sonda coaxial es la más empleada y consiste en un conector en contacto externo con el plano de masa y un pin interior que atraviesa el sustrato previamente agujereado, el pin de diámetro más pequeño se suelda al parche. Para conseguir una buena adaptación, habrá que situar la sonda coaxial en el punto más adecuado ya que de su posición dependerá que haya un mejor o peor acoplo.

En la siguiente imagen puede verse representado este tipo de alimentación:

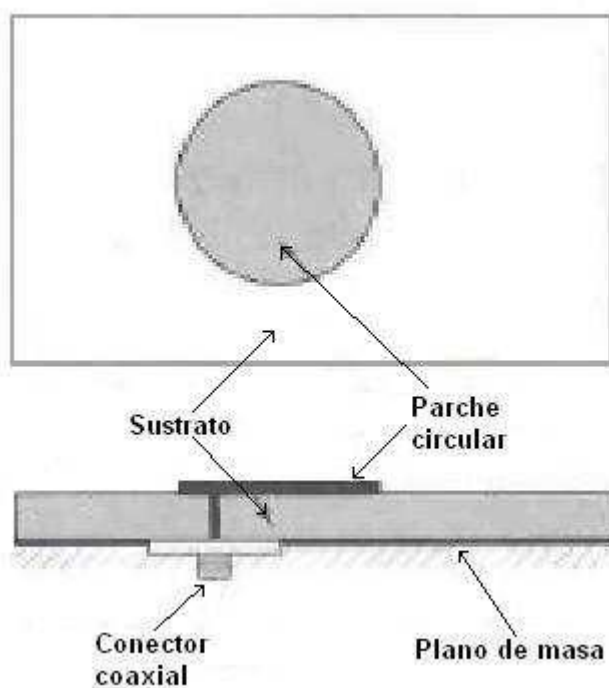


Ilustración 20. Alimentación directa por conector coaxial[10]

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

- Alimentación por proximidad: esta alimentación se lleva a cabo por acoplamiento electromagnético no habiendo contacto alguno con el parche. De este modo tendríamos el parche sobre sustrato, a continuación tendríamos la línea de metal, otra vez sustrato y el plano de masa tal y como se muestra en la próxima figura. Debido a este hecho, este modelo presenta ciertas ventajas como pueden ser poner un sustrato ancho y de permitividad eléctrica baja debajo de la antenna para mejorar sus prestaciones, y en cambio bajo la línea de alimentación un sustrato más fino con una permitividad alta. Una desventaja que presenta es que tiene una mayor complicación en fabricación.

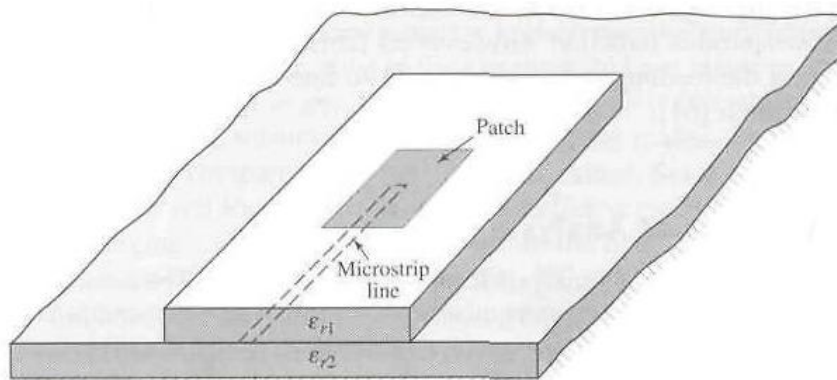


Ilustración 21. Alimentación de un parche por proximidad[10]

- Alimentación por apertura: este tipo de alimentación es parecido al anterior, aunque en este caso se colocaría el plano de tierra entre los dos sustratos y se le haría al mismo una apertura para alimentar al parche y el tamaño y posición de esta apertura será lo que determine una mejor o peor adaptación. Finalmente bajo el último sustrato se coloca la línea de metal que alimenta al parche. En la imagen que se muestra debajo se puede ver una representación de este tipo de alimentación.

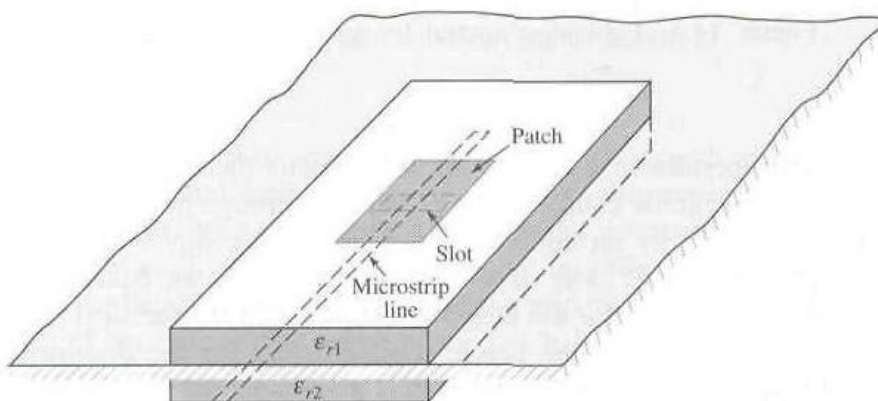


Ilustración 22. Alimentación de un parche por apertura[10]

1.8 Trabajos previos en parches de doble frecuencia con resonadores

Anteriormente ya se han comentado los resultados obtenidos en estudios hechos con diferentes tipos de antenas con OCSRRs y metamateriales. En este apartado se van a comentar los métodos empleados para obtener multifrecuencia en antenas de parche y los inconvenientes de algunos métodos empleados hasta ahora.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Uno de las técnicas más exitosas para conseguir parches multifrecuencia consiste en emplear parches apilados, pero supone pasar a una estructura multicapas, con un incremento del tamaño y complejidad de la antena. [6]

En este proyecto, como ya se ha comentado, se estudia una técnica novedosa para conseguir parches que funcionen en varias frecuencias para frecuencias arbitrarias y con diagrama de radiación de parche en ambas bandas.

A continuación se muestran algunos de los estudios realizados en antenas de parche con elementos resonantes planares. En primer lugar se presenta una antena de parche con un SRR y un hilo metálico, con este modelo se obtuvo un funcionamiento en doble banda. El único inconveniente que presenta es, como ya se ha comentado anteriormente, que el ancho de banda relativo obtenido es mucho menor que el obtenido con partículas OCSRRs, que como se comentó en el caso de dipolos y monopolos, doblaba el valor de ancho de banda relativo. En la ilustración 23 se puede ver este modelo diseñado.

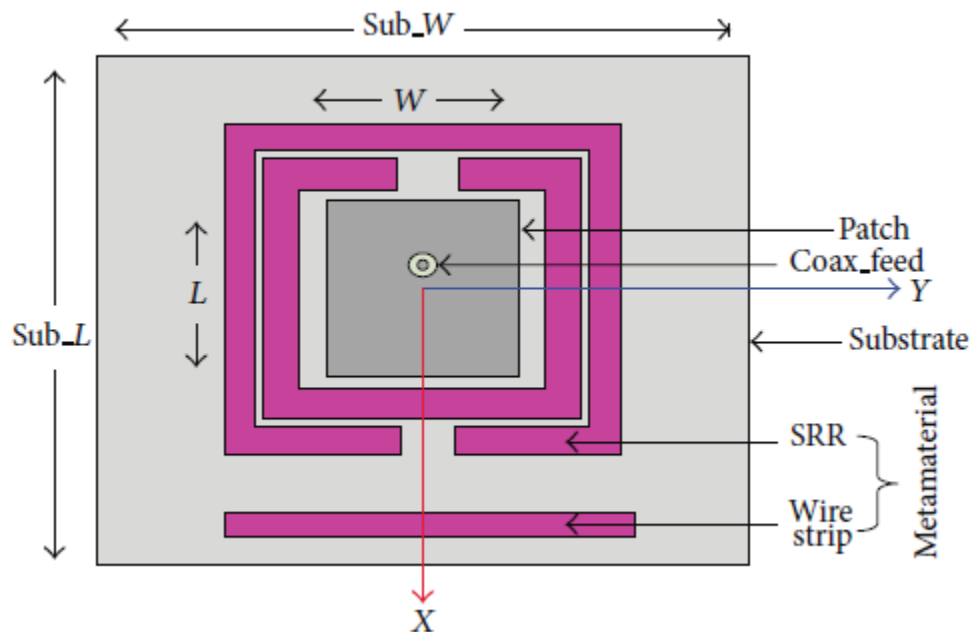


Ilustración 23. Parche con SRR e hilo metálico[12]

Otro estudio realizado también sobre antenas de parche para conseguir un funcionamiento de doble frecuencia con metamateriales, se realizó incluyendo partículas CSRR (las complementarias de los SRRs). En este estudio se obtuvo también un funcionamiento en doble banda, pero cabe destacar que las partículas OCSRRs aportan como ventaja con respecto a las CSRR, que su frecuencia es la mitad de la frecuencia de resonancia del CSRR con las mismas dimensiones y empleando el mismo sustrato. Por lo que los OCSRRs son partículas eléctricamente muy pequeñas. En la Ilustración 24 se muestra el diseño realizado con CSRRs con el que se obtuvo un comportamiento en doble frecuencia.

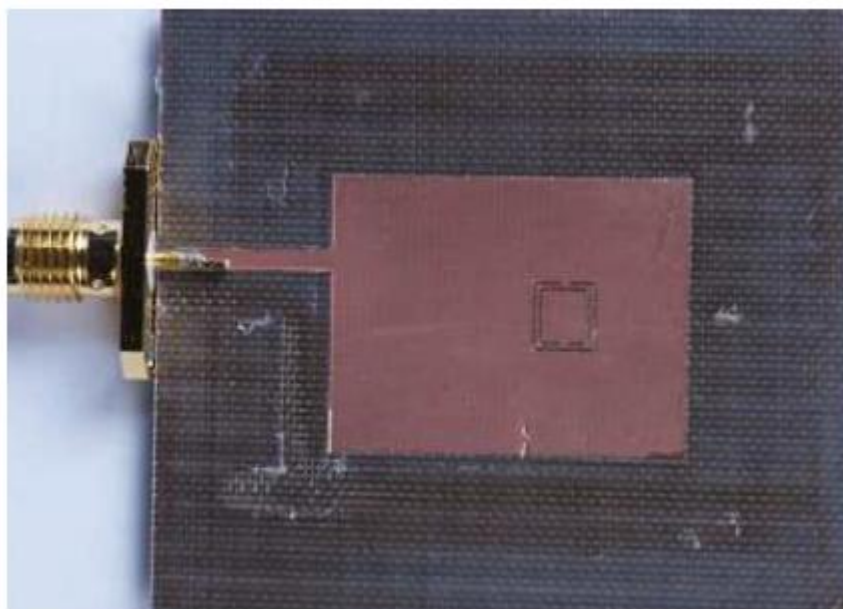


Ilustración 24. Diseño con partícula CSRR para obtener un parche funcionando en doble frecuencia [13]

2 ESTUDIO DE LA ANTENA DE PARCHES Y PARTÍCULAS OCSRRS

El objetivo fundamental de este proyecto es obtener un parche que funcione a varias frecuencias empleando una única estructura planar y con el mayor ancho de banda posible. Para ello se introducirán partículas resonantes en la estructura, que harán que nuestro parche tenga como funcionamiento su frecuencia fundamental y otra próxima a esta, resultándonos así de utilidad para comunicaciones inalámbricas.

Por ello el primer diseño que se pretende conseguir es un parche que funcione a dos frecuencias. Las frecuencias de funcionamiento serán elegidas de forma arbitraria. Aunque en los primeros diseños se partió de dos frecuencias establecidas, posteriormente fueron modificadas en los diseños definitivos debido a que no funcionaban de forma deseada, como se explicará a más adelante.

En este capítulo se va a contar cómo se comenzó el diseño del parche, se describe el parche a partir del cual se partió diseñando un parche típico de forma cuadrada para una frecuencia de partida. Posteriormente se expondrán las partículas resonantes empleadas (OCSRRs) junto con las dimensiones calculadas para las mismas para una frecuencia determinada.

A continuación, se mostrará un primer diseño en el que se emplearán únicamente dos OCSRRs (uno a cada lado del parche). A partir de los resultados obtenidos, se comprobará que este primer diseño no funcionaba de la forma deseada para nuestro parche multifrecuencia, por lo que se presentará seguidamente un segundo diseño mejorado en el que se añaden otros dos OCSRRs más a la estructura de forma perpendicular.

2.1 Descripción de la antena

La antena a diseñar para el proyecto realizado, como se ha comentado con anterioridad, debe ser un parche microstrip rectangular que es un tipo de antena que al ser plana, aporta numerosas ventajas para las comunicaciones inalámbricas.

Tal y como se ha explicado la antena impresa consiste en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico, y las dimensiones deben ser del orden de media longitud de onda debido a que se trata de un elemento resonante cuyas frecuencias de funcionamiento son múltiplos de $\frac{\lambda}{2}$.

El objetivo inicial fue construir un parche que funcionase a la frecuencia de wifi (2.45GHz). Más adelante, a lo largo del proyecto realizado, se verá que tuvo que modificarse este criterio para obtener un parche multifrecuencia que radiase de la forma deseada.

Un parche rectangular dispone de tres grados de libertad para realizar su diseño: la longitud del lado, el espesor del sustrato y la posición del puerto de alimentación. El valor de estos parámetros para conseguir que el parche funcione a 2.45GHz se ha determinado mediante simulaciones realizadas con el simulador CST Microwave Studio.

Además, también es necesario determinar el sustrato a emplear para su fabricación. Como también se ha comentado son preferibles los sustratos con espesores grandes y ϵ_r pequeñas, para el estudio del parche diseñado emplearemos como sustrato el polipropileno, que tiene una $\epsilon_r = 2.2$.

Como el lado del parche a diseñar debe ser de un tamaño próximo a $\lambda/2$ [7], y en nuestro caso, la frecuencia de trabajo es de 2.45GHz y $\epsilon_r = 2.2$, el tamaño del lado tendrá que tener un valor próximo a:

$$L \approx \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2.2}} \approx 41.28 \text{ mm}$$

El valor obtenido para el lado del parche es próximo a 40mm. Además, se toman unos valores del ancho y largo del sustrato de 62.5mm.

A la hora de alimentar el parche, se va a emplear un puerto discreto que permite modelar la alimentación coaxial, este puerto se probó en diferentes posiciones hasta llegar finalmente a comprobar que donde mejor salía nuestra frecuencia de funcionamiento ajustada a su valor y adaptada ocurría para una posición de este de 8mm a partir del centro del parche.

Mediante simulación partiendo de los datos anteriores, se han establecido los valores de los parámetros para que el parche funcione a la frecuencia deseada, mostrándose en la tabla siguiente, junto con la representación del parche que se ha simulado:

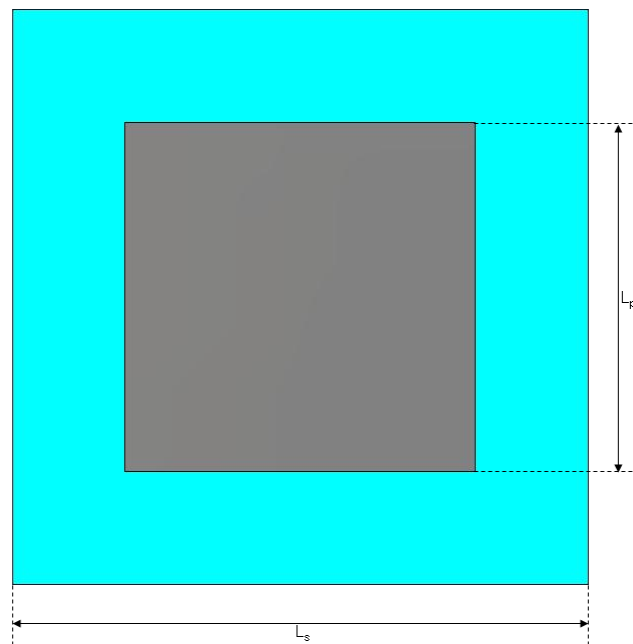


Ilustración 25. Vista frontal del parche convencional

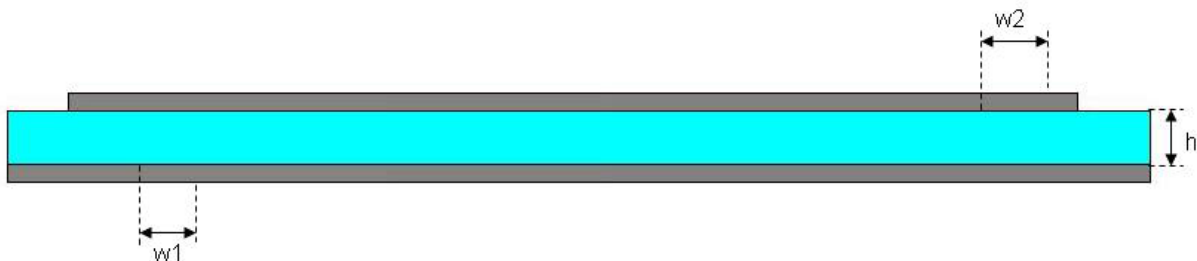


Ilustración 26. Corte lateral del parche convencional

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Tabla 1. Medidas y materiales del diseño del parche

	MATERIAL	PARÁMETRO	VALOR
SUSTRATO	PP	Largo(Ls)	62.5mm
		Ancho(Ls)	62.5mm
		Alto(h)	3mm
PLANO DE MASA	PEC	Largo(Ls)	62.5mm
		Ancho(Ls)	62.5mm
		Espesor metal(w1)	1mm
PARCHE CUADRADO	PEC	Largo(Lp)	38mm
		Espesor metal(w2)	0.035mm
PUNTO DE ALIMENTACIÓN	---	Posición respecto al centro del parche	8mm

En las siguientes figuras se pueden observar los resultados obtenidos mediante simulaciones para los valores anteriores. En la figura 27 podemos ver representado el parámetro $|S_{11}|$ de nuestro parche, comprobando que como esperábamos se encuentra adaptado para 2.48GHz que es una frecuencia próxima a 2.45GHz, teniendo una adaptación de unos -19dB. También podemos ver que se obtiene un ancho de banda que abarca de 2.44GHz a 2.53GHz correspondiéndose con un 3.47% de ancho de banda relativo. El ancho de banda relativo está calculado a -10dB, y la forma de calcularlo es la que se explicó en el apartado antenas de parche, que consiste en la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima (a -10 dB en este caso) que se encuentran entorno a la frecuencia de resonancia, dividido entre la frecuencia de resonancia y multiplicado por cien para obtener el porcentaje.

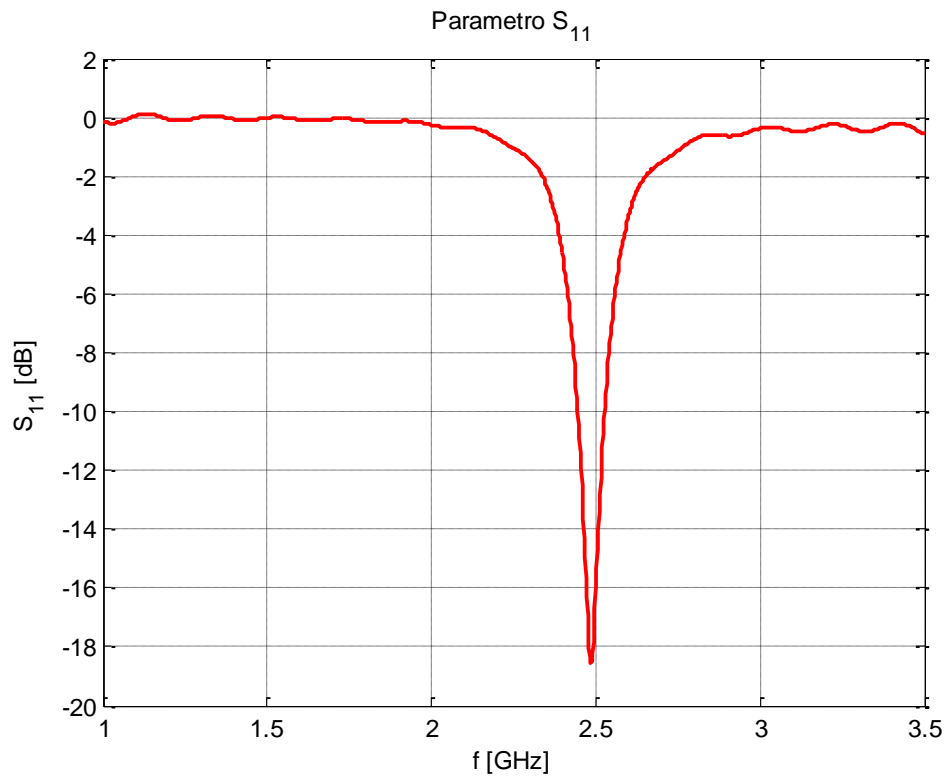


Ilustración 27. Parámetro $|S_{11}|$ para el parche diseñado que funciona a 2.45GHz

A continuación se muestra el diagrama de radiación en 3D que como puede verse radia en broadside, como cabía esperar. Vemos que se obtiene 7.34dB de directividad y una ganancia de 7.13dB.

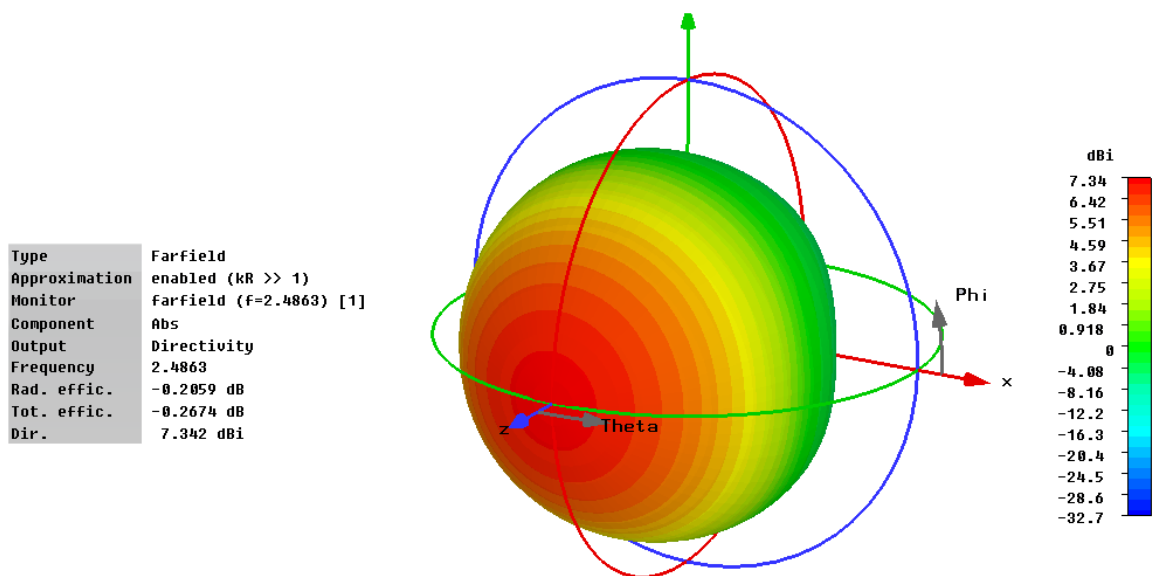


Ilustración 28. Diagrama de radiación del parche convencional a 2.45GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde comprobamos que la componente contrapolar alcanza un valor de -155dB en el

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

plano E y -34dB en el plano H siendo unos valores muy bajos debido a idealidades de la simulación. En la práctica los valores serán mayores.

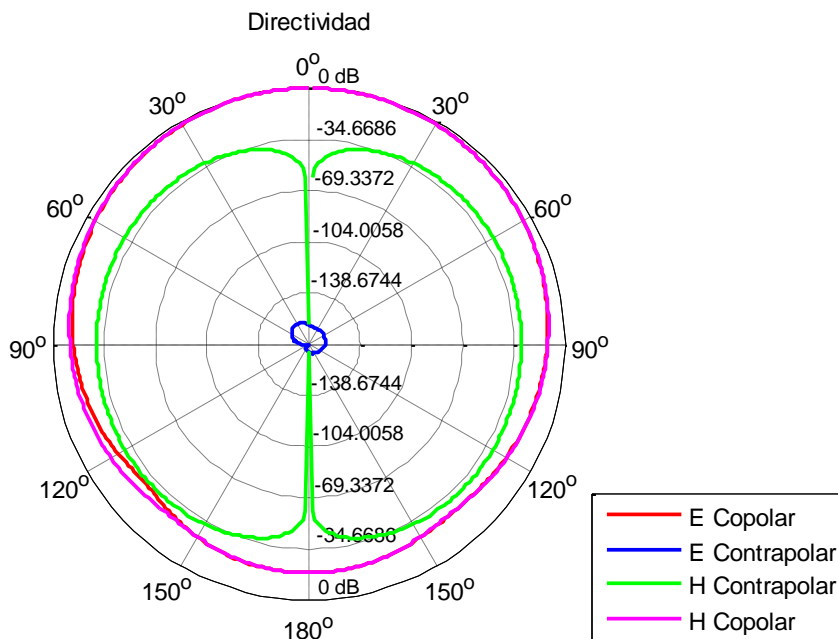


Ilustración 29. Diagrama de radiación en polares del parche convencional. Planos E y H a frecuencia 2.45GHz

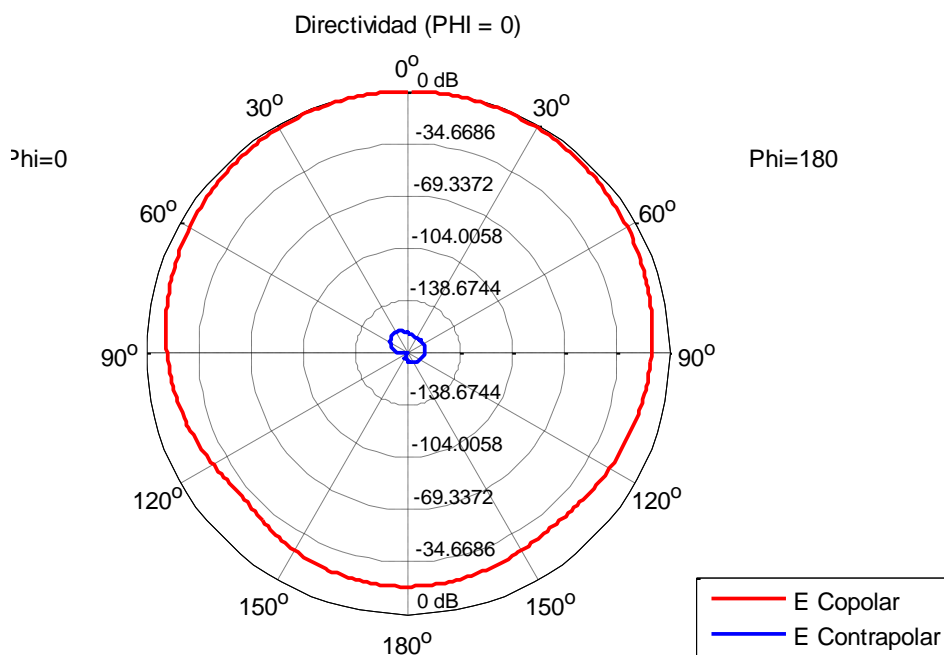


Ilustración 30. Diagrama de radiación en polares del parche convencional plano E a frecuencia de 2.45GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

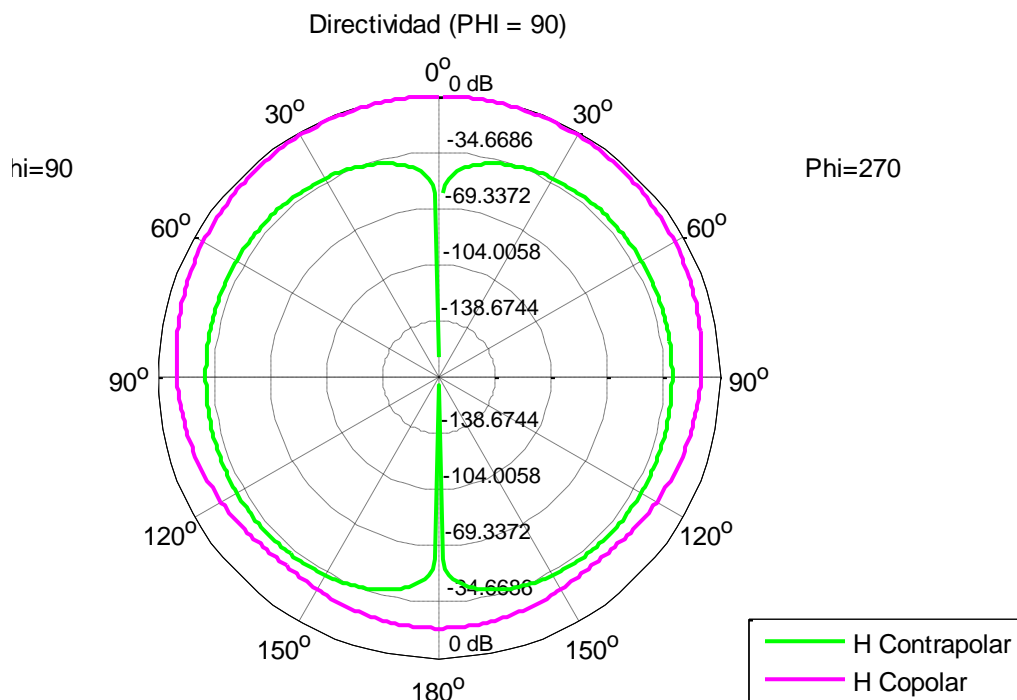


Ilustración 31. Diagrama de radiación en polares del parche convencional plano H a frecuencia 2.45GHz

En las siguientes imágenes vemos la distribución de campo eléctrico y de corrientes del parche. Podemos observar por la distribución de campo que se corresponde con el modo parche.

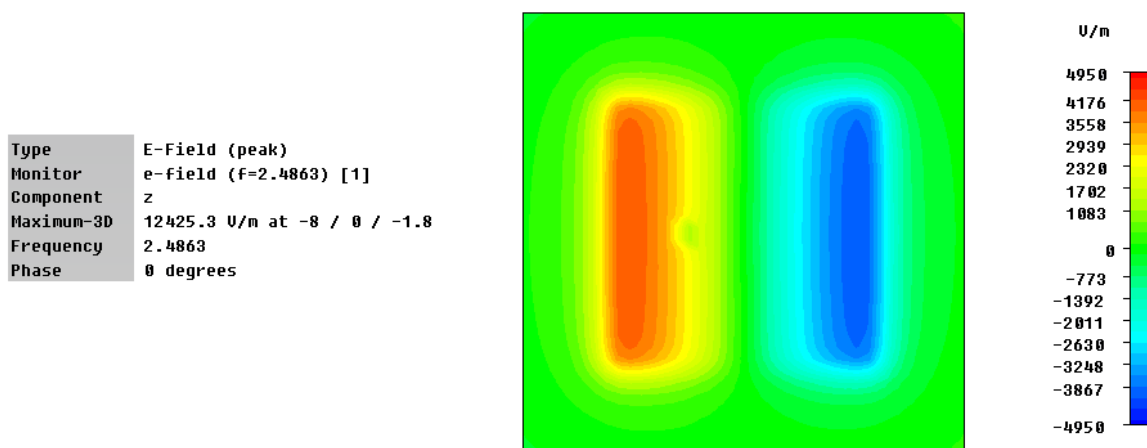


Ilustración 32. Distribución de campo eléctrico a frecuencia 2.45GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

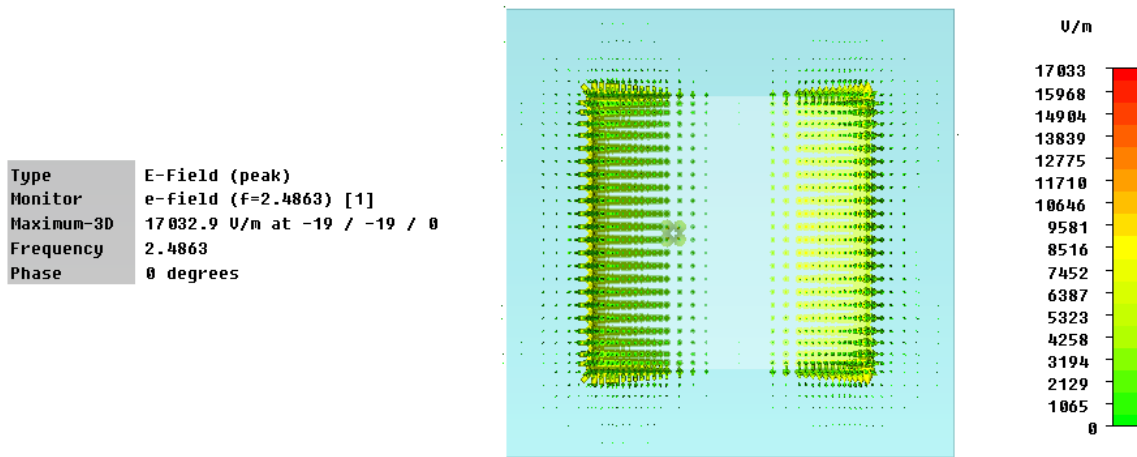


Ilustración 33. Distribución de corrientes a frecuencia 2.45GHz

Tras haber analizado el parche convencional del que se va a partir se presentará el diseño de las partículas resonantes que se van a implementar para cargar la antena de parche multifrecuencia.

2.2 Antena de parche cargada con dos OCSRRs

Una vez diseñado el parche a la frecuencia deseada de funcionamiento se procedió al estudio de las partículas resonantes que se iban a introducir para conseguir el funcionamiento de doble frecuencia deseado.

Los OCSRRs son las partículas complementarias abiertas de los SRR. Son eléctricamente más pequeños que los SRRs ya que su frecuencia de resonancia es aproximadamente la mitad que la de estos últimos.

En el diseño a implementar se han considerado OCSRRs de estructura cuadrada por lo que los parámetros que tendremos que diseñar serán la longitud externa (l_{ext}), la separación (c) y el ancho de las metalizaciones (d).

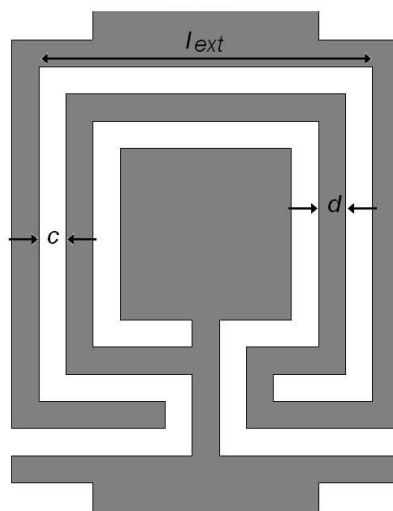


Ilustración 34. Diseño OCSRR

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Se ha querido diseñar los OCSRRs de forma que funcionen a la frecuencia de 3.5GHz. Para cumplir esta condición se han diseñado dando a cada parámetro los valores estimados a partir del modelo del CSRR que se encuentra en la literatura [14]. En la siguiente tabla vemos los valores obtenidos:

Tabla 2. Parámetros de diseño de los OCSRRs

Largo del OCSRR (l_{ext})	6.3mm
Huecos de los OCSRRs (c)	0.18mm
Grosor de la metalización (d)	0.18mm
Distancia del centro del parche a los OCSRRs	19.68mm ($L+0.5+c$)

A partir de estas partículas el primer estudio que se realizó fue poner dos OCSRRs a los lados del parche diseñados para 3.5GHz, dejando un gap en forma cuadrada de 0.5mm. En la siguiente figura se muestra el parche diseñado y a continuación una tabla donde se detallan las medidas detalladas empleadas en el diseño:

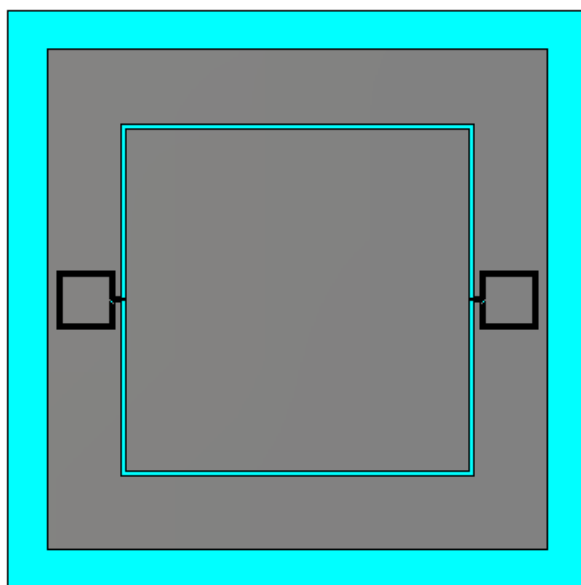


Ilustración 35. Parche cargado con 2 OCSRRs

Tabla 3. Medidas y materiales del diseño del parche

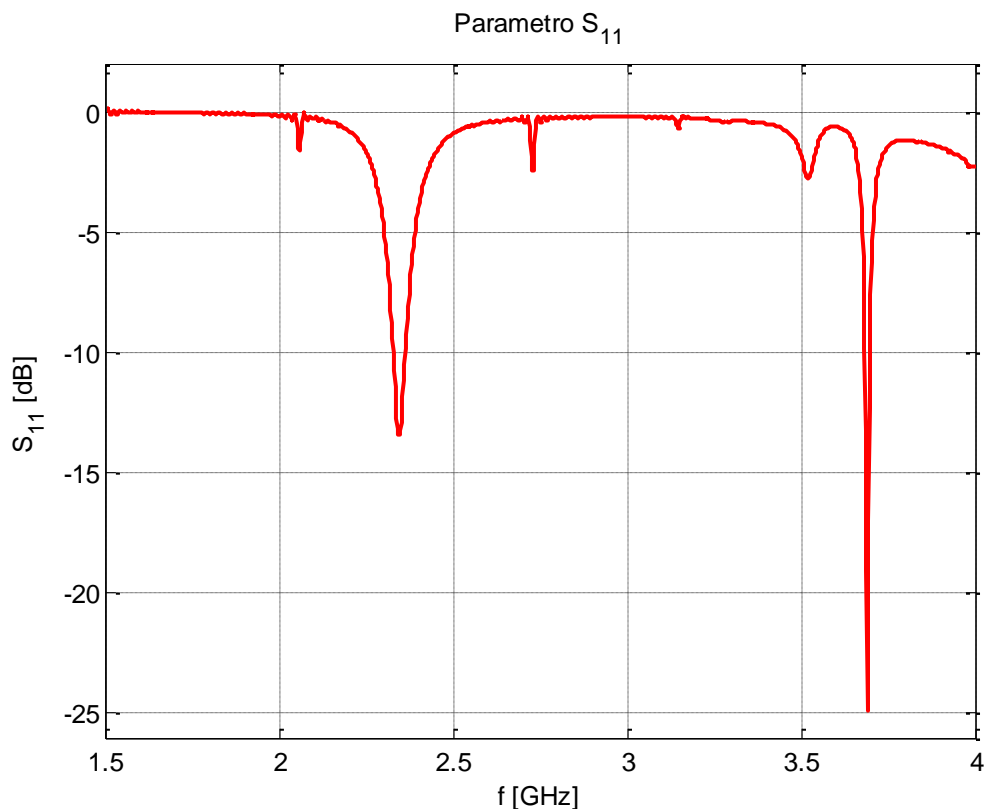
	MATERIAL	PARÁMETRO	VALOR
SUSTRATO	PP	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Alto	3mm

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

PLANO DE MASA	PEC	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Espesor metal	1mm
PARCHE CUADRADO EXTERNO	PEC	Largo(Lpe)	54mm
		Alto	0.035mm
PARCHE CUADRADO INTERNO	PEC	Largo(Lpi)	38mm
		Espesor metal	0.035mm
PUNTO DE ALIMENTACIÓN	---	Posición respecto al centro del parche	8mm

En las siguientes figuras se pueden observar los resultados obtenidos mediante simulaciones para los valores anteriores. En la primera figura podemos ver representado el parámetro $|S_{11}|$ de nuestro parche, comprobando que como esperábamos obtenemos un funcionamiento en doble frecuencia. Podemos ver que la frecuencia de funcionamiento del parche se ha desplazado levemente encontrándose ahora en 2.34GHz con una adaptación de -12.6dB. La segunda frecuencia se encuentra a 3.69GHz con una adaptación de -25dB.

También podemos ver que se obtiene un ancho de banda que abarca de 2.32GHz a 2.35GHz para la primera frecuencia, correspondiéndose con un 1.41% de ancho de banda relativo. En el caso de la segunda frecuencia abarca de 3.68GHz a 3.7GHz obteniendo así un ancho de banda de 0.46%.



Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Ilustración 36. Parámetro $|S_{11}|$ para la antena con 2 OCSRRs

En la Ilustración 37 se puede ver el diagrama de radiación en 3D. Como se puede observar radia en broadside, como cabía esperar, para la frecuencia de radiación del parche. Vemos que se obtiene para esta frecuencia 7.28dB de directividad y una ganancia de 7.29dB.

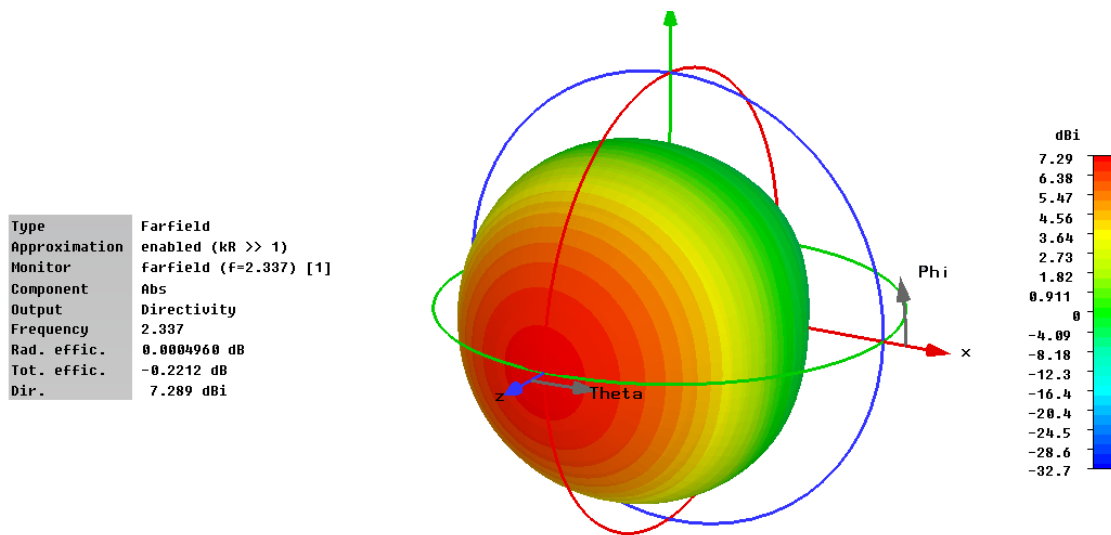


Ilustración 37. Diagrama de radiación del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde vemos que la componente contrapolar alcanza un valor de -27dB en el plano E y -35dB en el plano H , valor adecuado de componente contrapolar, pero mayor que en el parche aislado.

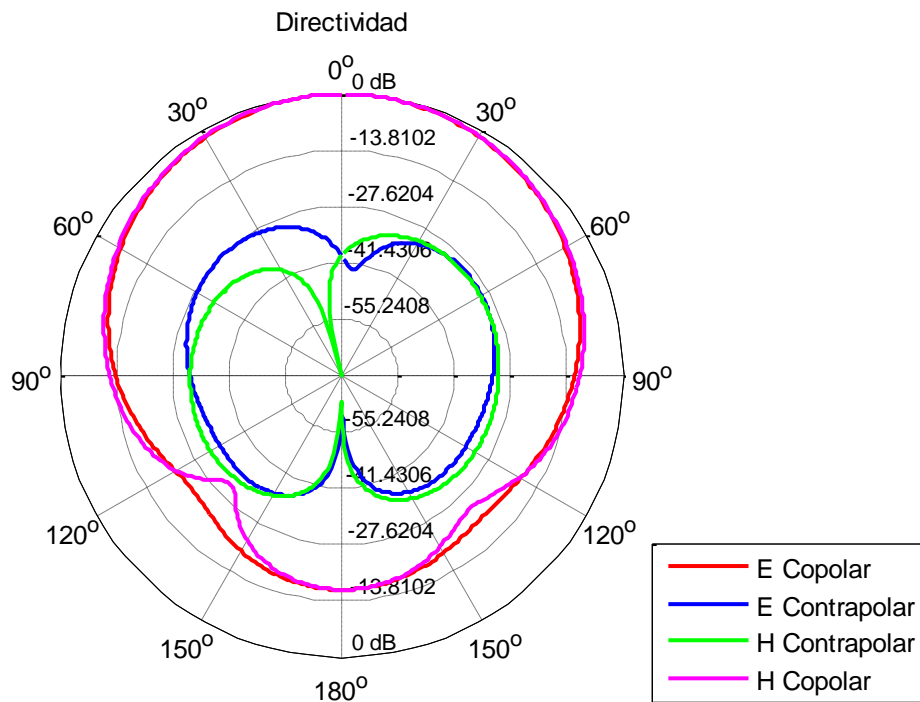


Ilustración 38. Diagrama de radiación en polares del parche planos E y H con OCSRRs en 2.33GHz

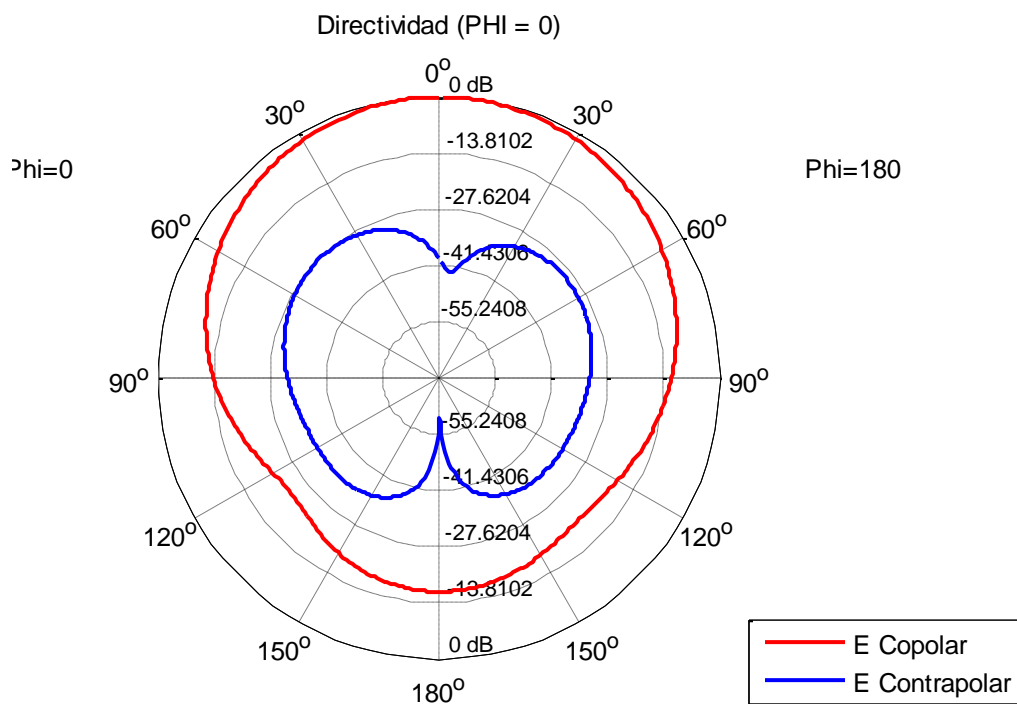


Ilustración 39. Diagrama de radiación en polares del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz plano E

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

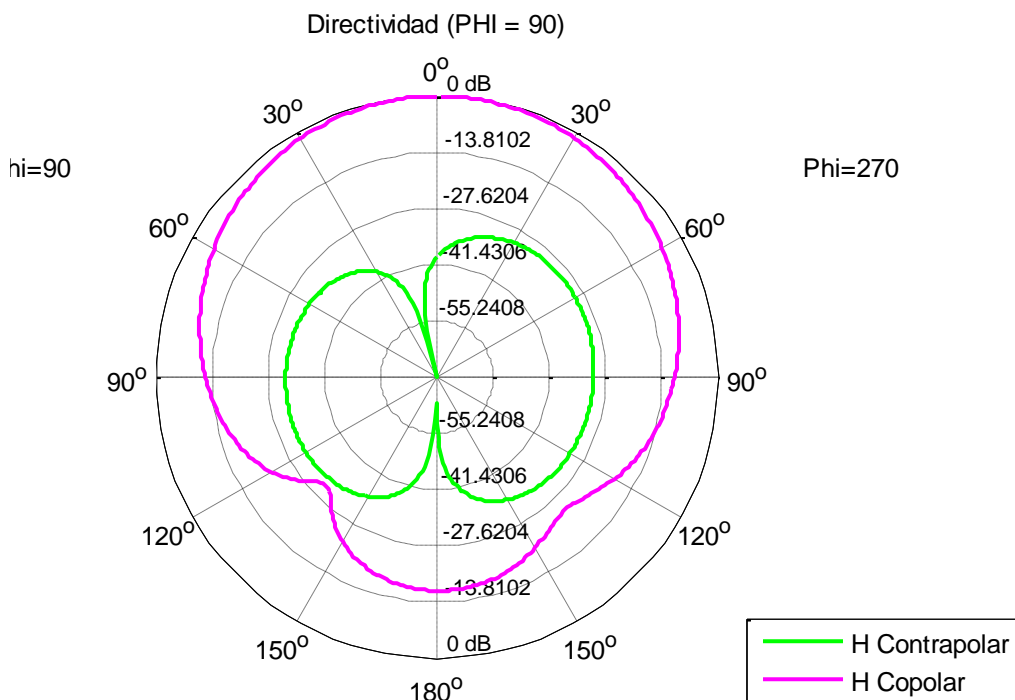


Ilustración 40. Diagrama de radiación en polares del parche cargado con OCSRRs en 2.33GHz plano H

En las siguientes imágenes vemos la distribución de campo eléctrico y de corrientes del parche. Podemos observar por la distribución de campo que se corresponde con el modo parche.

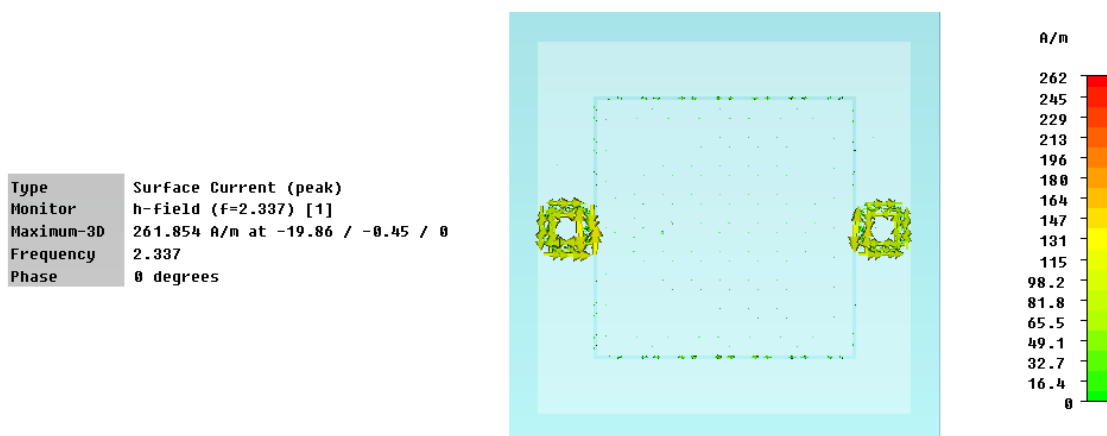


Ilustración 41. Distribución de corrientes en 2.33GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

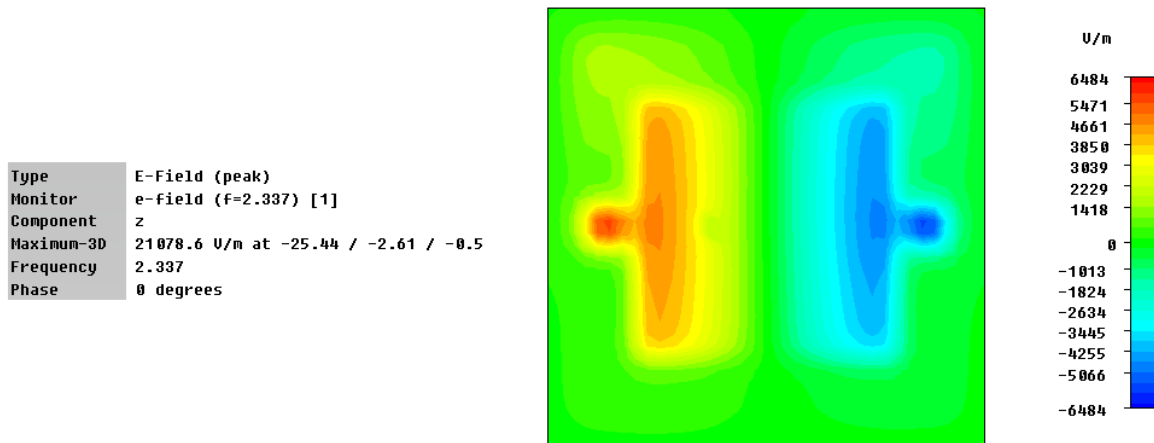


Ilustración 42. Distribución de campo Eléctrico en 2.33GHz

En la siguiente figura se puede ver el diagrama de radiación en 3D para la segunda frecuencia debida a las partículas resonantes introducidas. Como puede verse el diagrama de radiación es multilobulado con 4 lóbulos, comportamiento que no es el que esperábamos obtener ya que deseamos que nuestra antena radie en dos frecuencias pero que se corresponda con un diagrama de radiación en broadside para ambas. La directividad obtenida en este caso es 5.97dB y la ganancia es 5.96dB.

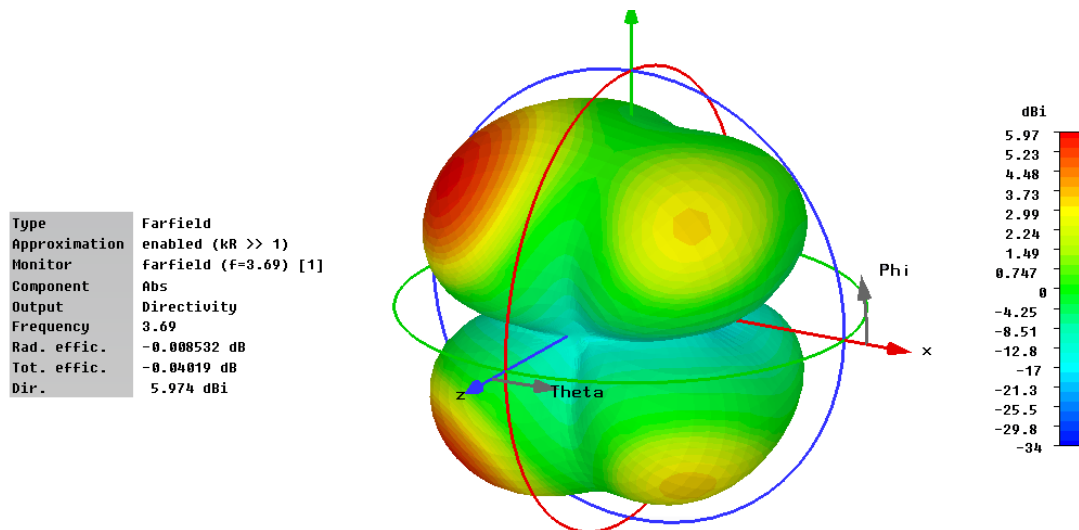


Ilustración 43. Diagrama de radiación del parche con 2 OCSRRs en 3.69GHz

Se representa también el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde vemos que la componente contrapolar alcanza un valor de -17dB en el plano E y de -8dB en el plano H siendo unos valores no adecuados de componente contrapolar ya que se corresponden con valores muy elevados.

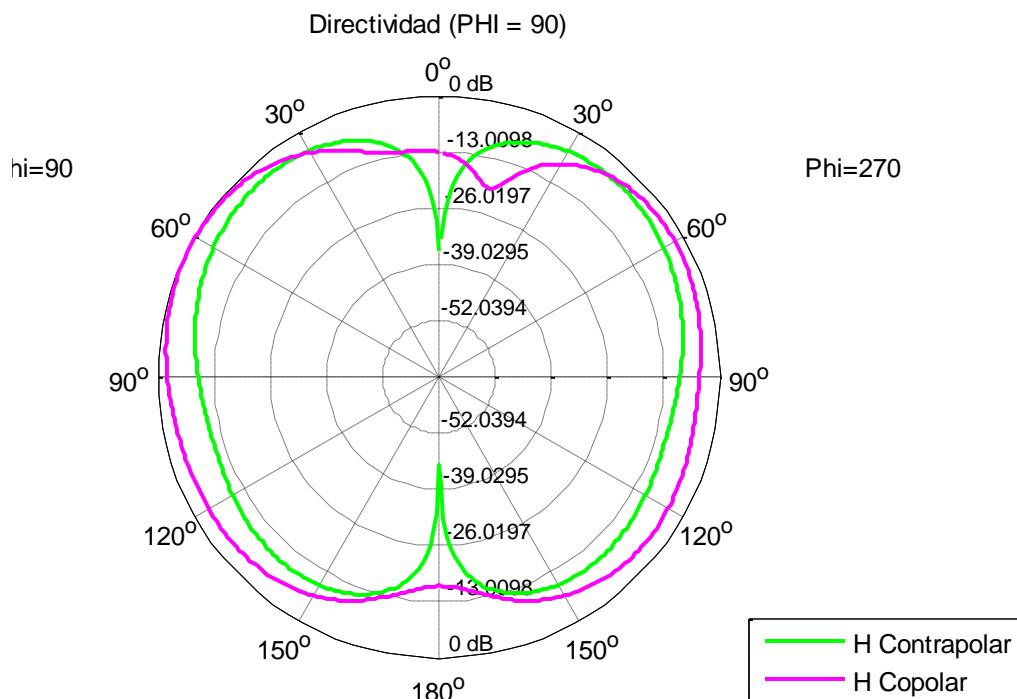


Ilustración 46. Diagrama de radiación en polares del parche con 2 OCSRRs en 3.69GHz plano H

En las siguientes imágenes vemos la distribución de campo eléctrico y de corrientes del parche. Podemos observar por la distribución de campo que se corresponde con un parche con diagrama de radiación multilobulado tal y como hemos comentado.

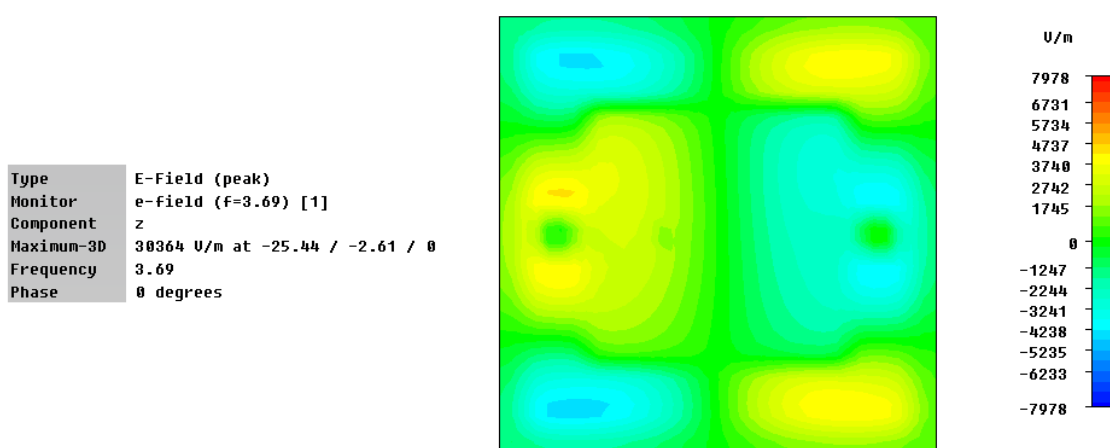


Ilustración 47. Distribución del campo eléctrico en 3.69GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

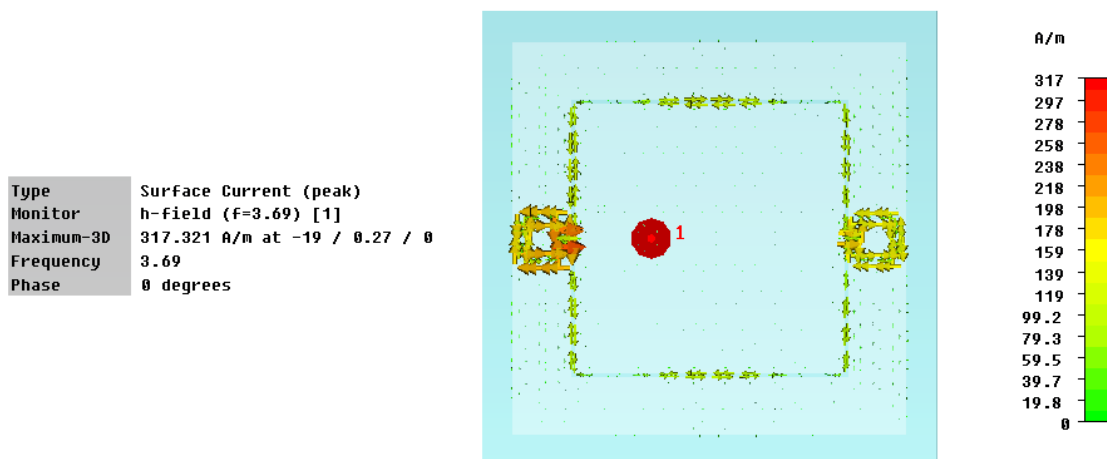


Ilustración 48. Distribución de corrientes en 3.69GHz

Debido a que no se ha obtenido el comportamiento esperado en el comportamiento del parche para ambas frecuencias en cuanto al modo de radiación, ya que como se ha visto se obtiene un parche con cuatro lóbulos de radiación a la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs, se va a estudiar en el siguiente punto otra forma de poner las estructuras resonantes, y se estudiarán los resultados obtenidos del mismo modo que se hizo en este punto.

2.3 Antena de parche cargada con cuatro OCSRRs

En este apartado se estudia una nueva estructura para conseguir que a la frecuencia de los OCSRRs el parche radie en broadside al igual que ocurre para su frecuencia fundamental. Para ello en primer lugar se decidió añadir dos OCSRRs más a la estructura colocándolos en la línea perpendicular a la que se encontraban los anteriores para simetrizar la estructura, tal y como puede verse en la ilustración 49:

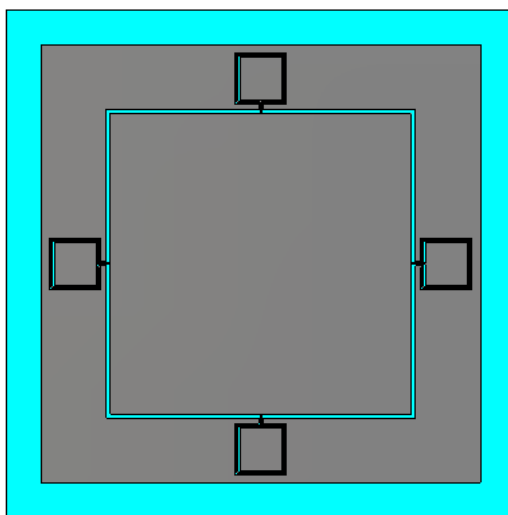


Ilustración 49. Vista frontal del parche con 4 OCSRRs

El resto de parámetros se mantuvo con las mismas dimensiones que en el punto anterior diferenciándose sólo en la inclusión de las dos partículas resonantes.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

A continuación se muestran los resultados obtenidos en simulación para esta nueva estructura.

En primer lugar vemos la representación del parámetro $|S_{11}|$. Podemos ver como siguen apareciendo dos frecuencias con una buena adaptación. Para la primera de ellas correspondiente a la fundamental del parche observamos que se encuentra en 2.3GHz comprobando que se ha desplazado de nuevo levemente con respecto a la obtenida en el caso anterior, su adaptación es de -17.2dB. La segunda frecuencia se encuentra ahora en 3.76GHz sufriendo también un leve desplazamiento. Su adaptación en este caso es de -14.2dB.

El ancho de banda para la frecuencia de 2.3GHz abarca de 2.27GHz a 2.32GHz obteniendo de este modo un ancho de banda relativo de 2.25%. La segunda va de 3.74GHz a 3.78GHz obteniendo en este caso un ancho de banda de 1.26%.

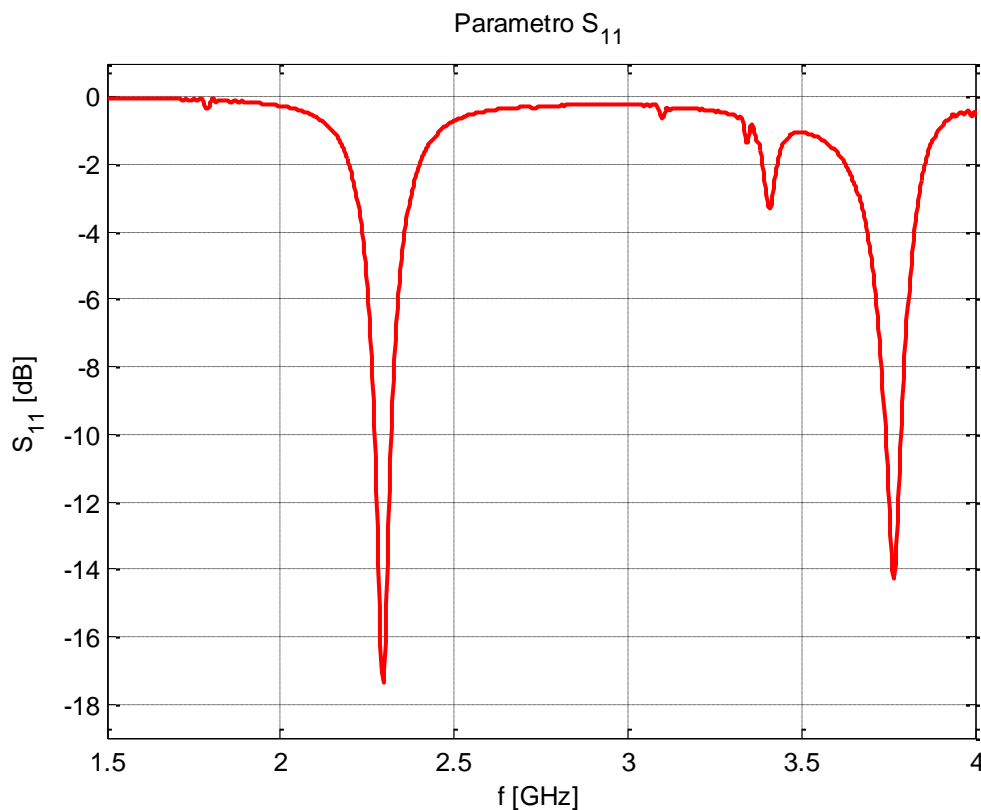


Ilustración 50. Parámetro $|S_{11}|$ para la antena con 4 OCSRRs

En la siguiente gráfica se representa el diagrama de radiación en 3D con el comportamiento esperado al igual que en el caso anterior. Podemos ver como se comporta con una radiación tipo parche y que se obtiene un valor de directividad de 7.32dB y de ganancia 7.32dB.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

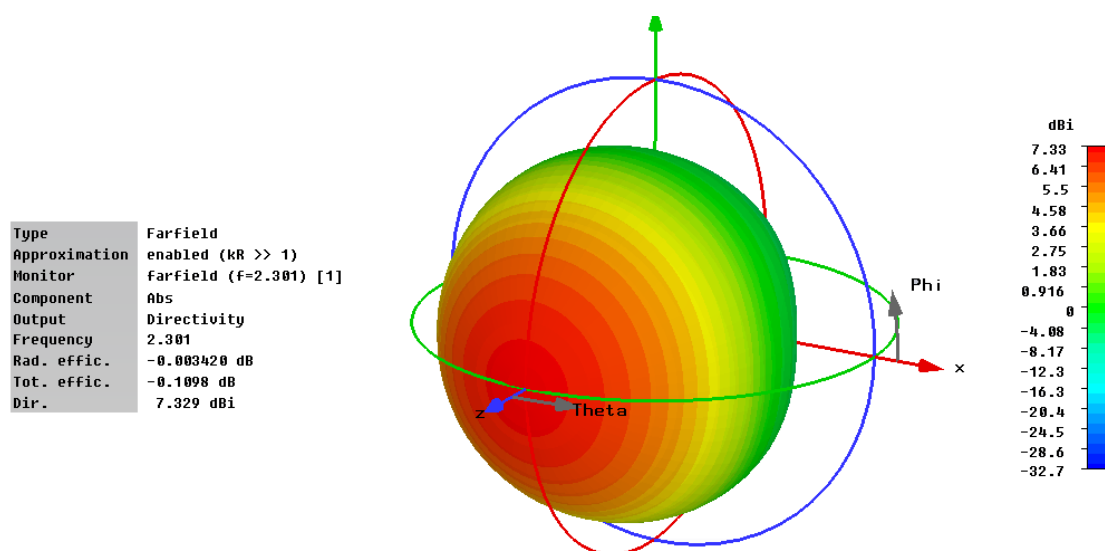


Ilustración 51. Diagrama de radiación del parche con 4 OCSRRs en 2.3GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares para ver el corte del plano E y H donde se observa un valor de componente contrapolar de -27dB para el plano E y de -25.8dB para el plano H.

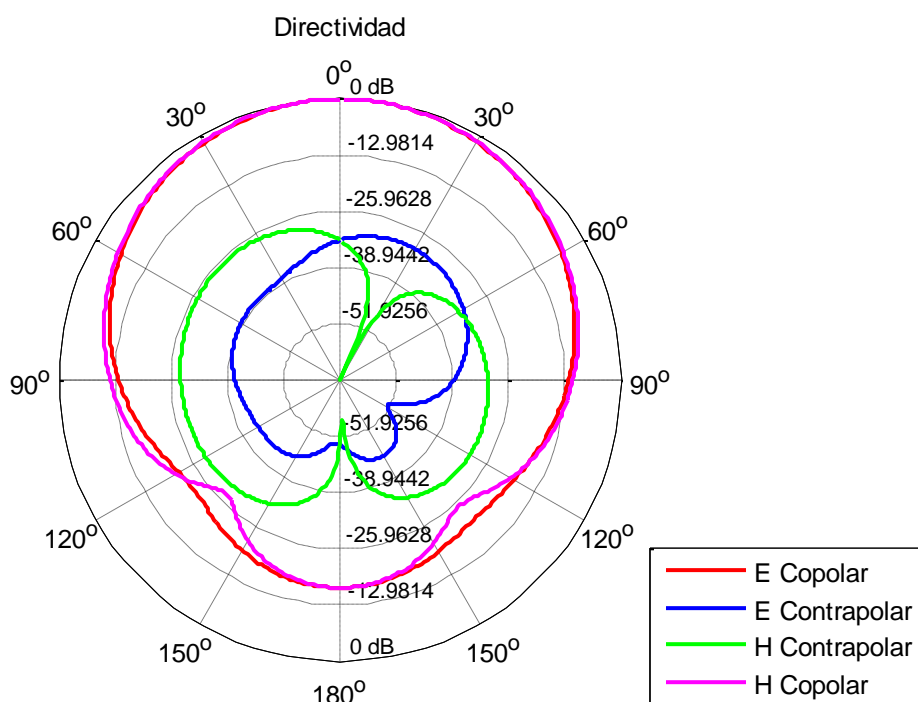


Ilustración 52. Diagrama de radiación del parche en polares planos E y H con 4 OCSRRs en 2.3GHz

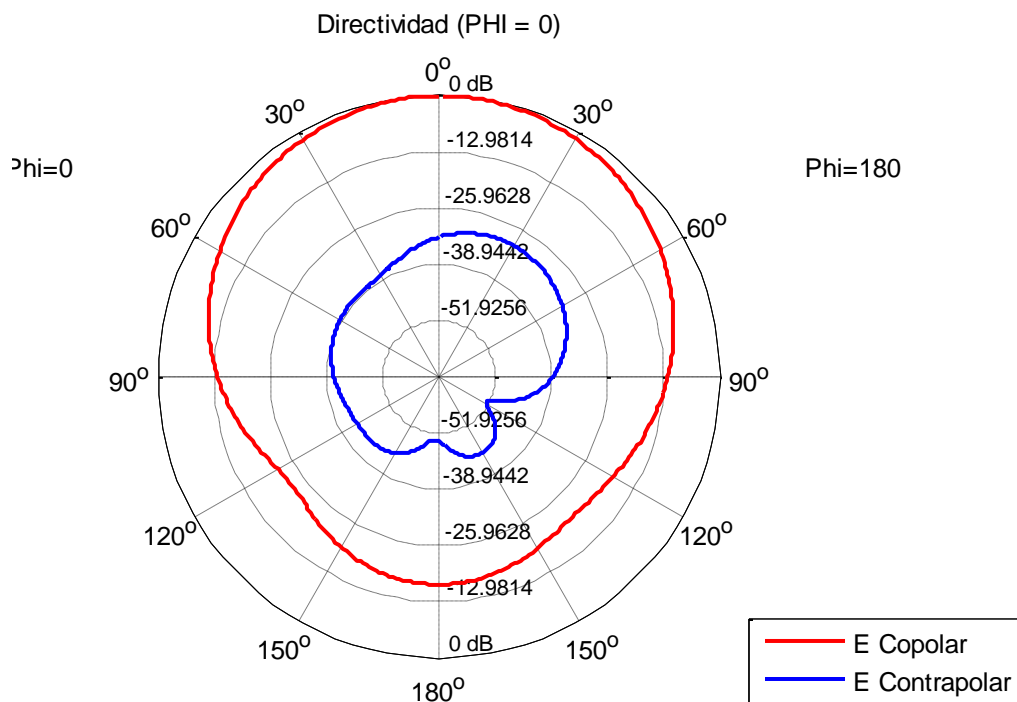


Ilustración 53. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.3GHz plano E

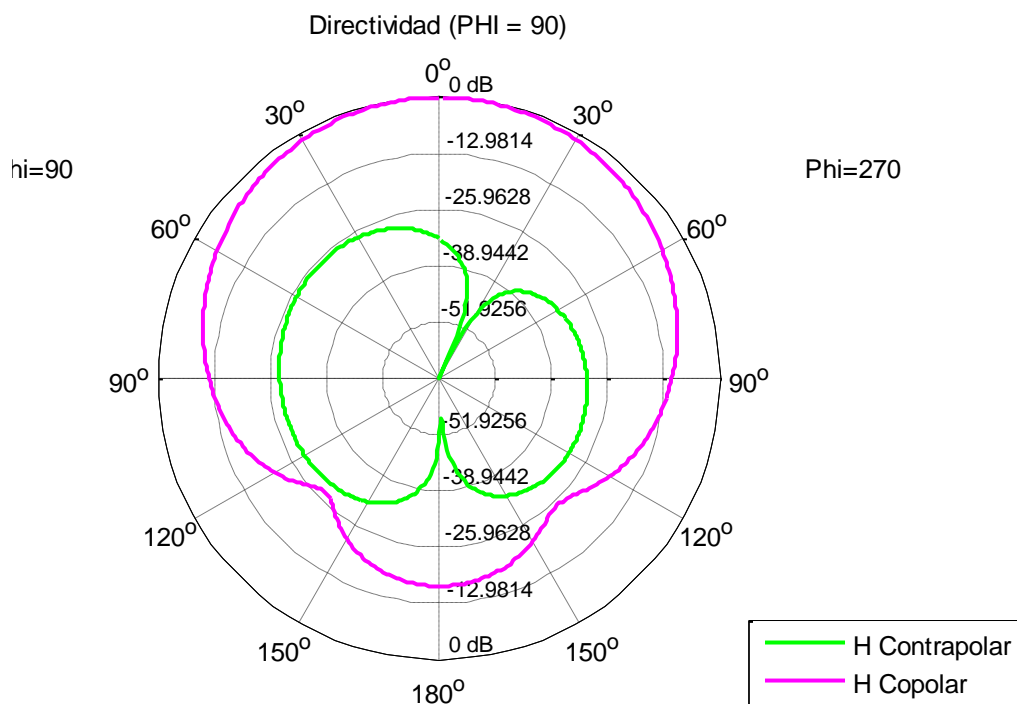


Ilustración 54. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.3GHz plano H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

En las siguientes figuras se pueden ver representados la distribución de campo eléctrico y de corrientes observando que se comporta en modo parche.

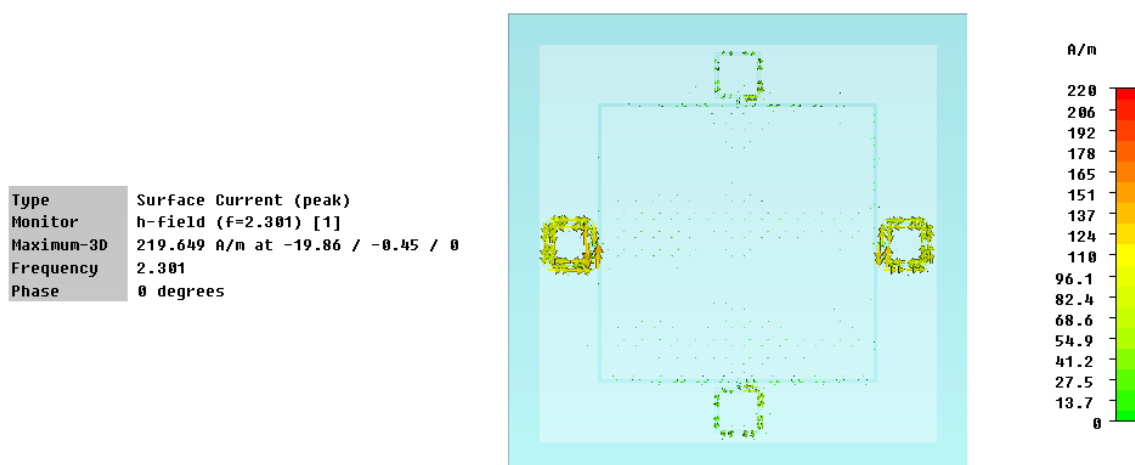


Ilustración 55. Distribución de corrientes en 2.3GHz

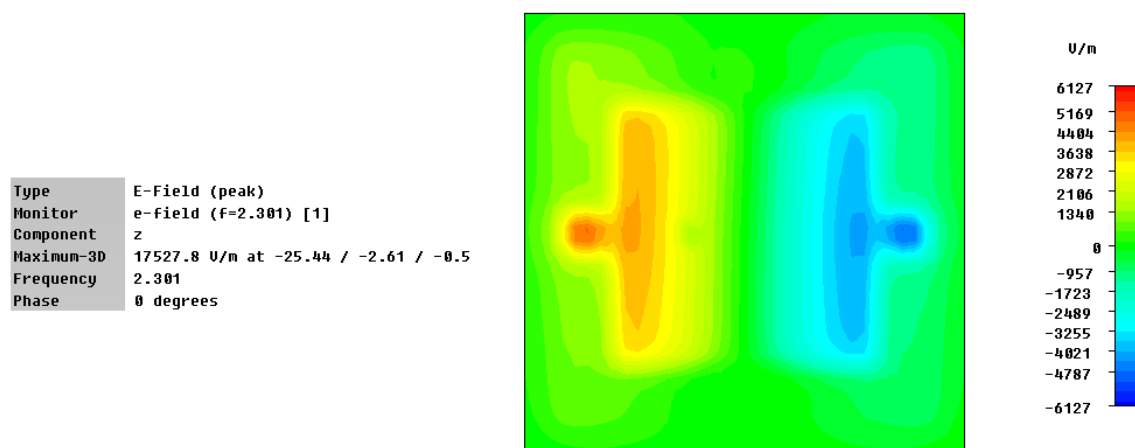


Ilustración 56. Distribución de campo Eléctrico en 2.3GHz

Para la frecuencia de resonancia de los OCSRRs representamos el diagrama de radiación en 3D comprobando que en este diseño cambia el modo de funcionamiento con respecto al diseño anterior obteniendo un nulo en broadside que sigue sin ser el deseado para el funcionamiento de la antena que se pretende conseguir. Vemos como se alcanza una directividad de 5.09dB y una ganancia 5.08dB.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

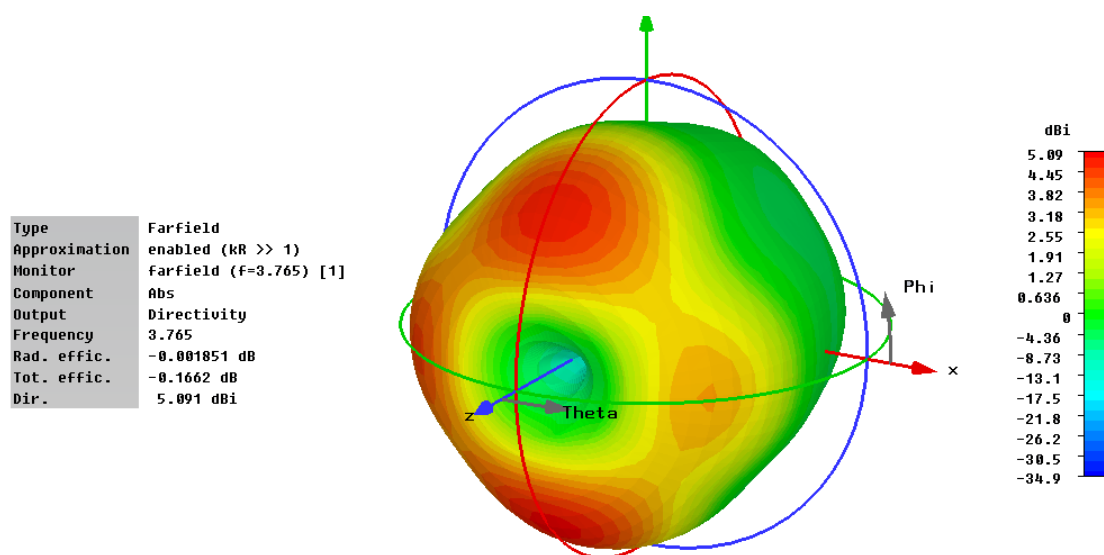


Ilustración 57. Diagrama de radiación del parche con 4 OCSRRs en 3.76GHz

Representamos al igual que en los casos anteriores el diagrama de radiación en polares donde observamos los valores que alcanzan las componentes contrapolares. En este caso vemos como para el plano E tenemos una componente contrapolar de -27dB y para el plano H es de -18dB. Tenemos valores adecuados de componente contrapolar aunque no obtenemos el modo de radiación deseado.

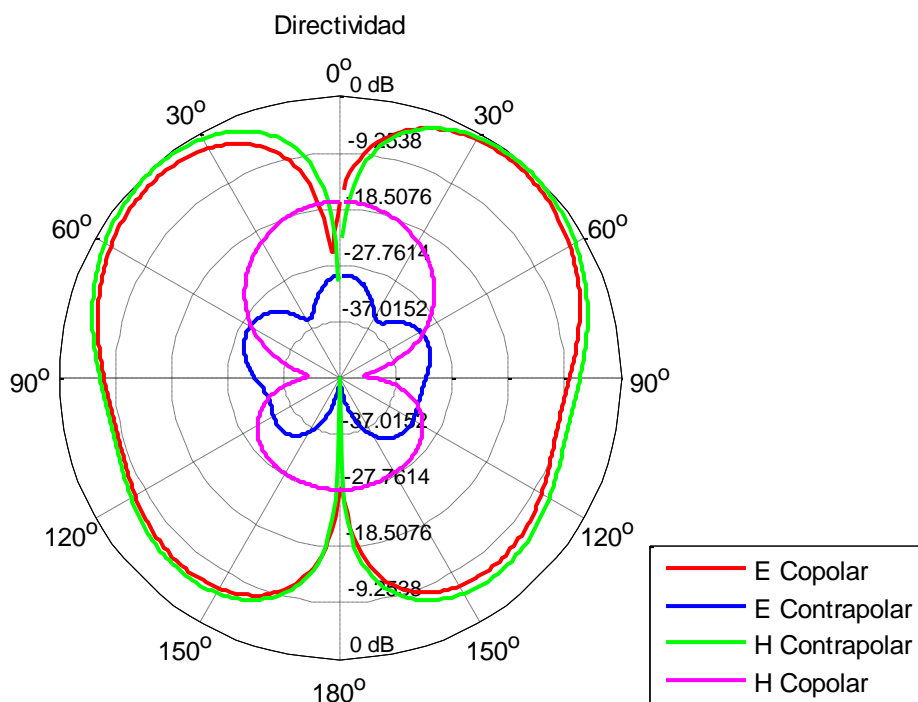


Ilustración 58. Diagrama de radiación del parche en polares planos E y H con 4 OCSRRs en 3.76GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

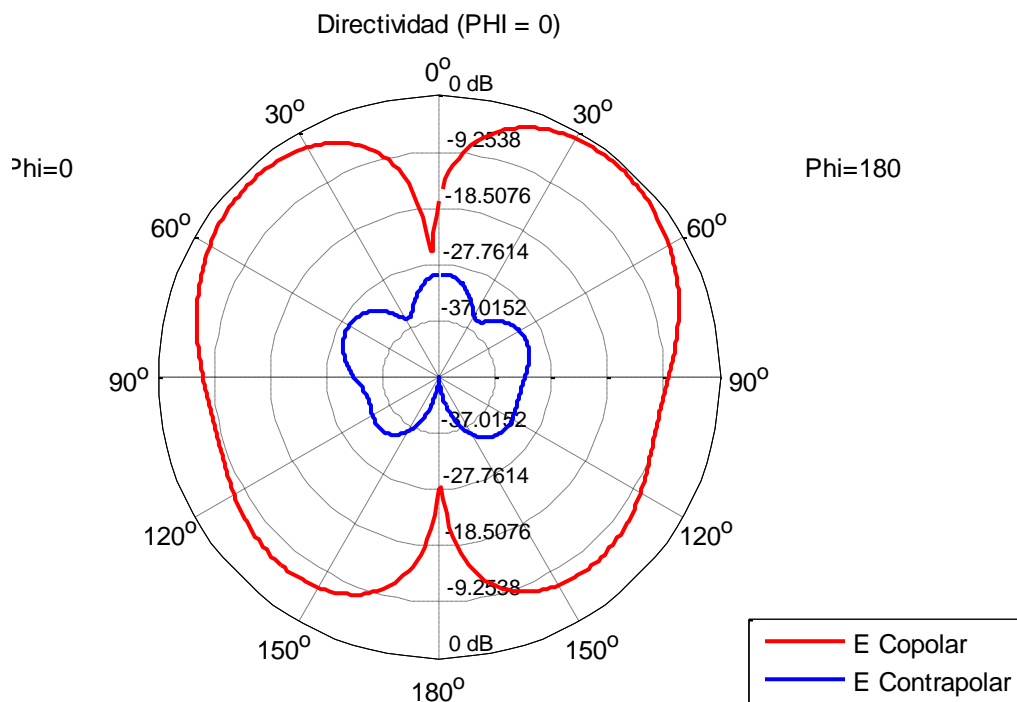


Ilustración 59. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 3.76GHz plano E

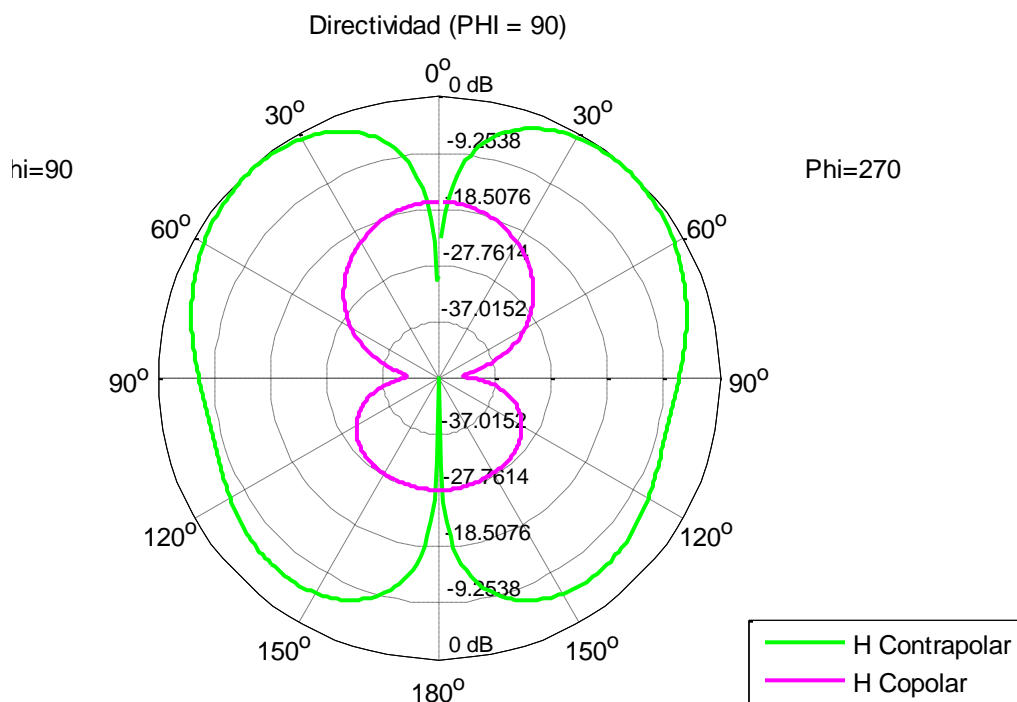


Ilustración 60. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 3.76GHz plano H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Por último vemos representados los diagramas de campo eléctrico y distribución de corrientes observando que hay una distribución de campo uniforme en la zona central, tal y como se ha comprobado en la representación del diagrama de radiación.

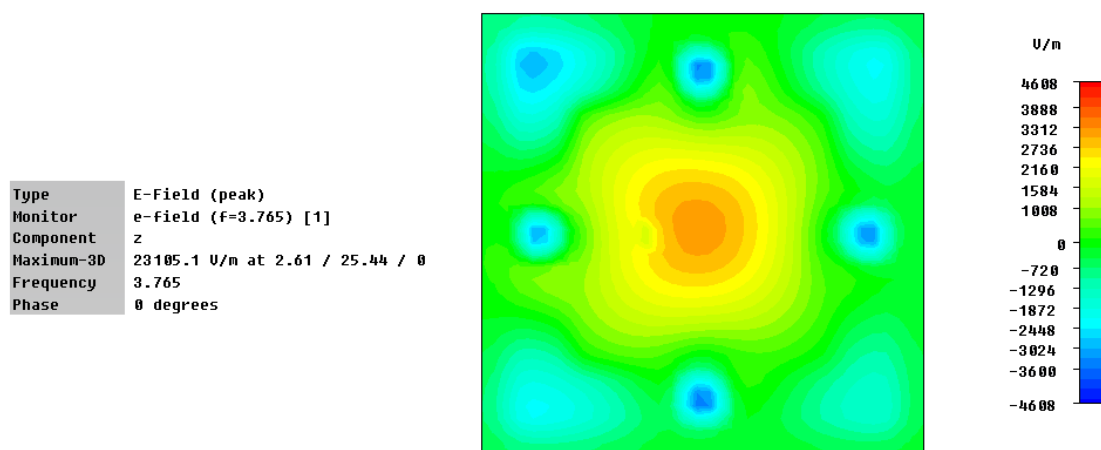


Ilustración 61. Distribución del campo eléctrico en 3.76GHz

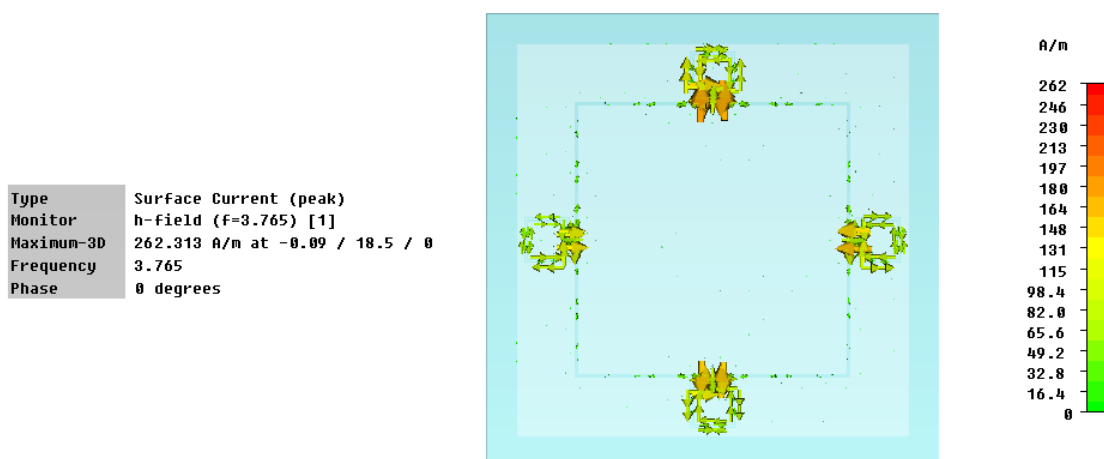


Ilustración 62. Distribución de corrientes en 3.76GHz

2.4 Comparativa del parche convencional y cargado con OCSRR

A partir del estudio inicial realizado se muestra a continuación una tabla con los parámetros más característicos del parche para realizar una comparativa entre las tres antenas simuladas. En la siguiente gráfica se puede ver la representación del parámetro $|S_{11}|$ para los tres tipos de antenas, correspondiéndose la primera resonancia con la producida por el parche y la segunda a las partículas resonantes OCSRRs, para los dos casos de doble frecuencia.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

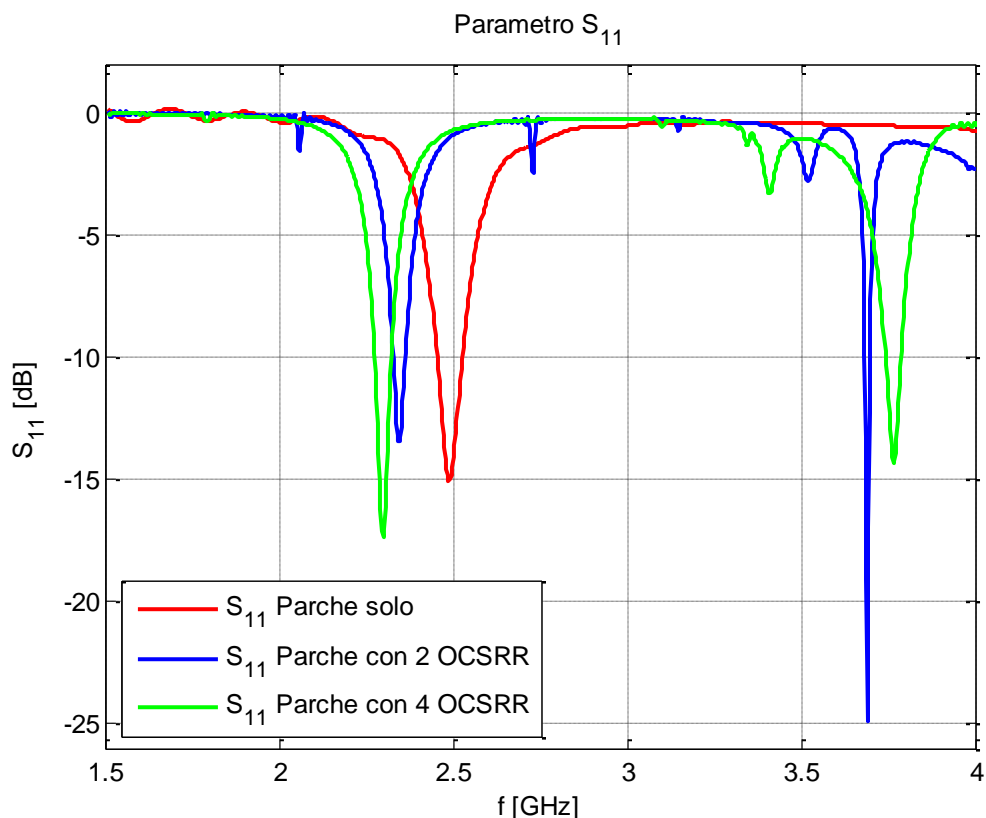


Ilustración 63. Comparativa del parámetro $|S_{11}|$ para parche convencional, parche cargado con 2 OCSRRs y parche cargado con 4 OCSRRs

Tabla 4. Comparativa del parche convencional, con 2 OCSRRs y con 4 OCSRRs

	Frecuencia de Funcionamiento	Ancho de Banda	Diagrama Radiación	Directividad
Parche convencional	2.48GHz	3.47%	Tipo parche	7.34dB
Parche cargado con 2 OCSRRs	2.33GHz	1.41%	Tipo parche	7.28dB
	3.69GHz	0.46%	Multilobulado	5.97dB
Parche cargado con 4 OCSRRs	2.30GHz	2.25%	Tipo parche	7.32dB
	3.76GHz	1.26%	Con nulo en broadside	5.09dB

Como se ha visto, en los resultados obtenidos para las simulaciones anteriores se puede observar que en la antena de parche convencional (sin estar cargada con los OCSRRs) sólo hay una banda de frecuencia en la región de interés centrada en 2.48 GHz, sin embargo al cargarla con dos y cuatro OCSRRs hemos obtenido un funcionamiento en doble frecuencia viendo que la frecuencia de funcionamiento del parche se ha desplazado a 2.33GHz para el caso de dos OCSRRs y a 2.3GHz para el caso de cuatro partículas resonantes. Este desplazamiento de la frecuencia haciendo que

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

ésta se encuentre por debajo del valor de la del parche fundamental se debe al comportamiento inductivo de los OCSRRs por debajo de esta frecuencia.

También se puede ver como para el caso de dos OCSRRs la frecuencia de las partículas resonantes se encontraba en 3.69GHz, pero al introducir dos más esta frecuencia se ha desplazado levemente hasta 3.76GHz.

En cuanto al ancho de banda podemos observar que para la frecuencia fundamental del parche se ha reducido pasando de 3.47% a 1.41% en el caso del parche cargado con dos OCSRRs, pero ha mejorado con respecto a este último el del parche cargado con cuatro OCSRRs siendo 2.25% y habiéndose reducido también respecto al del parche convencional. En cuanto al ancho de banda de las partículas resonantes vemos que se ha mejorado considerablemente al introducir dos partículas resonantes más pasando de 0.46% a 1.26%.

Además de comparar el ancho de banda obtenido con los parches, también es necesario comprobar que estén funcionando en el mismo modo. Para determinar el modo de funcionamiento de los parches es necesario comparar las distribuciones de campo eléctrico obtenidas en las simulaciones. En el caso que nos ocupa, se puede comprobar que en los tres casos el parche está funcionando en el modo fundamental para su frecuencia de funcionamiento no ocurriendo lo mismo a la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs.

Podemos ver a partir de la distribución de campo eléctrico y del diagrama de radiación, que en el parche que tiene dos partículas resonantes aparece un diagrama de cuatro lóbulos que no nos interesa para el estudio ya que queremos que a ambas frecuencias funcione con diagrama tipo parche. Por este motivo, se añadieron otros dos OCSRRs en perpendicular viendo que tenemos el mismo problema ya que obtenemos un diagrama con un nulo en broadside que sigue sin ser el buscado, consiguiendo así únicamente para este último diseño, mejorar el ancho de banda como se ha comentado.

En vista de los datos obtenidos, podemos concluir que el parche mantiene el mismo comportamiento a su frecuencia fundamental variando el ancho de banda relativo únicamente. En cuanto al comportamiento del diagrama de radiación a la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs podemos ver que no es el deseado, por lo que en el próximo capítulo se detallarán los cambios realizados para intentar conseguir un diagrama de radiación de tipo parche en ambas frecuencias de funcionamiento buscando, a su vez, mejorar el ancho de banda relativo.

3 ANTENA DE PARCHE CARGADA CON CUATRO OCSRR

En el presente capítulo se va a mostrar el diseño definitivo al que se llegó tras los resultados obtenidos anteriormente. En primer lugar se detallarán las modificaciones realizadas en la antena anterior para cumplir los objetivos del diseño. En este nuevo diseño se cambiaron las frecuencias de funcionamiento para conseguir dos frecuencias próximas arbitrarias que radiasen de forma broadside, que es el objetivo principal.

Posteriormente, se mostrarán los resultados obtenidos teóricamente y una comparativa con el parche convencional para comparar los resultados obtenidos en simulación. Finalmente se mostrará la antena construida junto a los resultados experimentales obtenidos. Al final del capítulo se realizará una comparativa entre los obtenidos de forma teórica y experimental.

3.1 Descripción de la antena

Para comenzar se va a describir la estructura final obtenida tras el resultado de varias pruebas. El parche diseñado funciona en dos bandas, una debida al parche completo externo que es el que funciona a la frecuencia inferior y otra debida a la resonancia introducida por los OCSRRs cuya frecuencia de funcionamiento se corresponde con la frecuencia superior.

Debido a que no se obtenía el modo de radiación deseado, se pensó que podía deberse a que próxima a la frecuencia de resonancia de los OCSRRs se encontraba otra resonancia del parche externo, pudiendo producir este hecho la aparición de un modo superior. Por este motivo, se decidió probar a cambiar las dimensiones de la estructura interna formada por los cuatro OCSRRs y la cavidad interna creada debido a ellos y a su vez por este cambio se movió también el punto de alimentación para ajustar la adaptación de las frecuencias.

Tal y como se describió en los capítulos anteriores, seguimos empleando como sustrato el polipropileno, que tiene una $\epsilon_r = 2.2$. Para la alimentación de este modelo sigue empleándose un puerto que permite modelar la alimentación coaxial.

En la siguiente figura podemos ver el nuevo parche junto a una tabla con sus nuevas dimensiones:

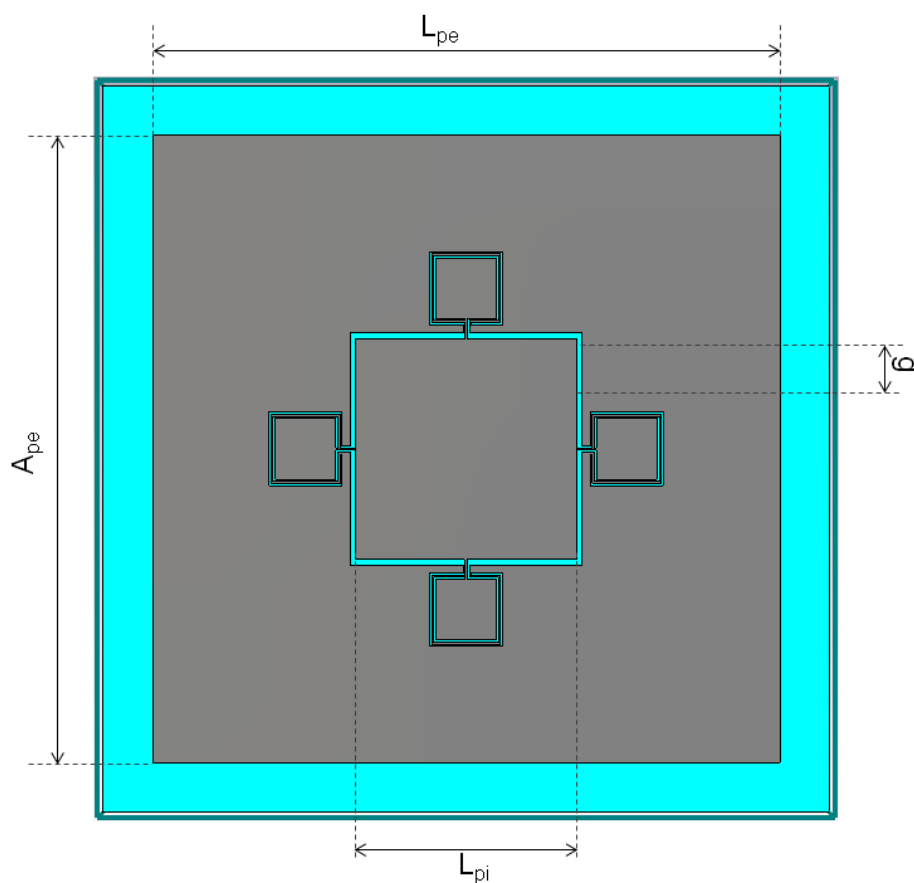


Ilustración 64. Diseño definitivo del parche con 4 OCSRRs

Tabla 5. Medidas y materiales del diseño del parche

	MATERIAL	PARÁMETRO	VALOR
SUSTRATO	PP	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Alto	5mm
PLANO DE MASA	PEC	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Espesor metal	1mm
PARCHE CUADRADO EXTERNO	PEC	Largo(L_{pe})	54mm
		Espesor metal	0.035mm
PARCHE	PEC	Largo(L_{pi})	19.5mm

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

CUADRADO INTERNO		Espesor metal	0.035mm
PUNTO DE ALIMENTACIÓN	---	Posición respecto al centro del parche	8.75mm

Los OCSRRs siguen siendo los mismos que los estudiados anteriormente, cambiando únicamente la distancia del centro del parche a los OCSRRs debido a que se aumentó 0.5mm el lado del parche interno para tener un poco más de margen al desplazar el puerto de alimentación. También se modificó el punto de alimentación del parche.

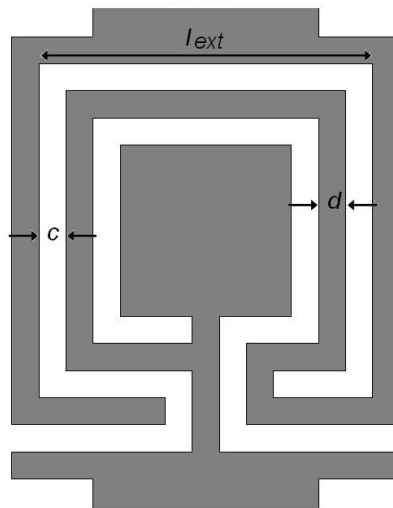


Ilustración 65. Diseño OCSRR

Tabla 6. Parámetros de diseño de los OCSRRs

Largo del OCSRR (l_{ext})	6.3mm
Huecos de los OCSRRs (c)	0.18mm
Grosor de la metalización (d)	0.18mm
Distancia del centro del parche a los OCSRRs	20.18mm ($19.5+g+c$)
Gap (g) que separa el parche interno del OCSRR	0.5

3.2 Modelo circuital equivalente

En este apartado se va a contar cómo sería el modelo circuital equivalente a nuestro parche a partir del cual obtendríamos dos resonancias en las frecuencias de funcionamiento del parche diseñado. Para plantear este circuito en primer lugar se describe a qué elementos circuital es equivale cada componente del parche.

Los OCSRRs son elementos resonantes que se corresponden con un circuito LC en paralelo que para unos valores de L y C calculados para la frecuencia de funcionamiento de las partículas resonantes simulan esta misma. Los valores aproximados obtenidos han sido $L=11\text{nH}$ y $C=0.4\text{pF}$.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSR

El parche tal y como se ha explicado en este proyecto es otro elemento resonante que equivale a una línea $\frac{\lambda}{2}$, los huecos equivalen a condensadores y la alimentación coaxial se simula empleando una bobina.

En la ilustración 66 se puede ver el modelo circuital con los valores de cada elemento, en la ilustración 68 se representa el parámetro $|S_{11}|$ obtenido para este circuito viendo que se obtienen dos resonancias a las frecuencias del parche aunque también se puede comprobar que no se obtuvo la adaptación deseada. La ilustración 67 muestra los componentes empleados en el circuito y a qué parte del circuito equivalen para que se vea más claro el equivalente circuital.

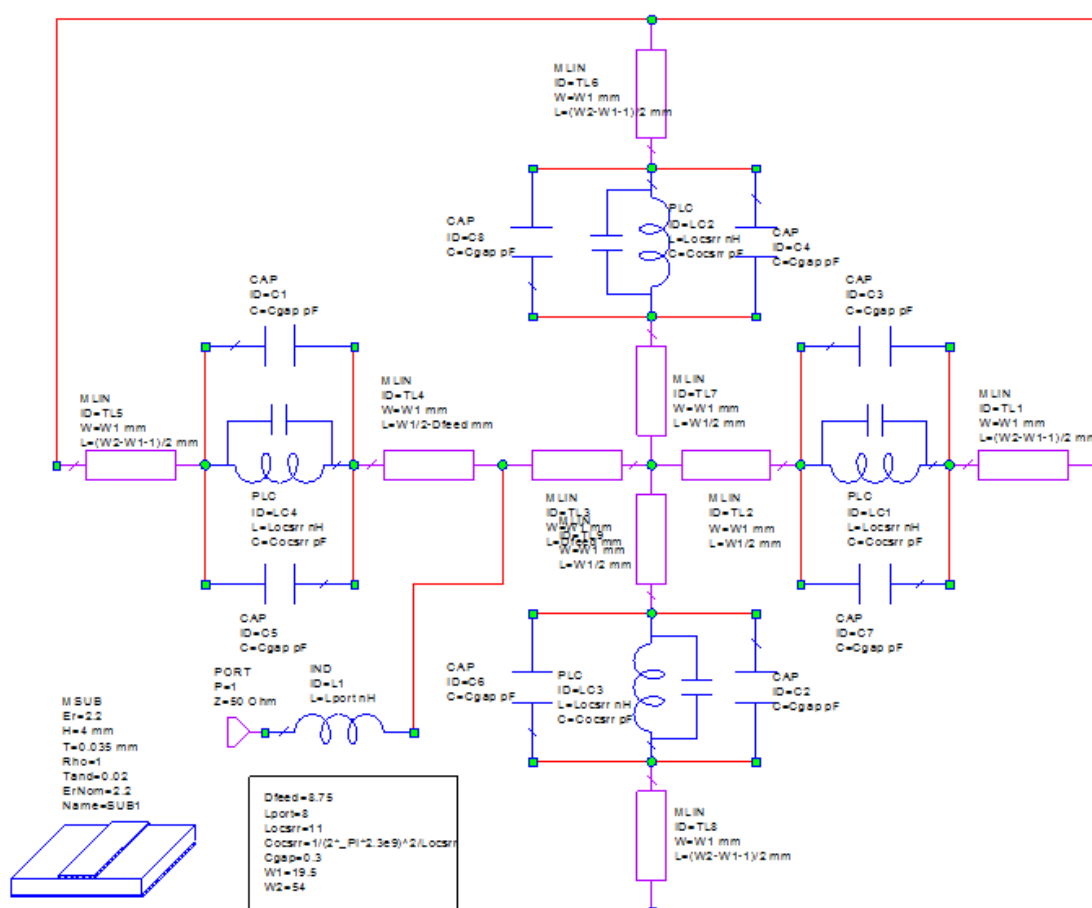


Ilustración 66. Modelo circuital equivalente del parche diseñado

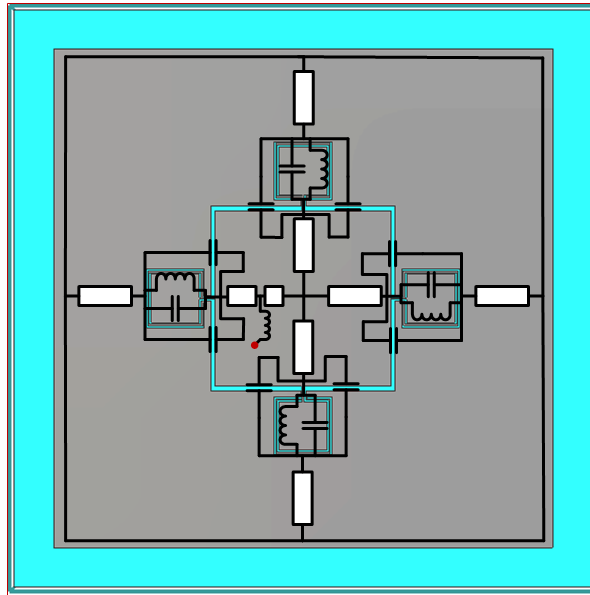


Ilustración 67. Equivalencia de los elementos circuitales con las partes del parche

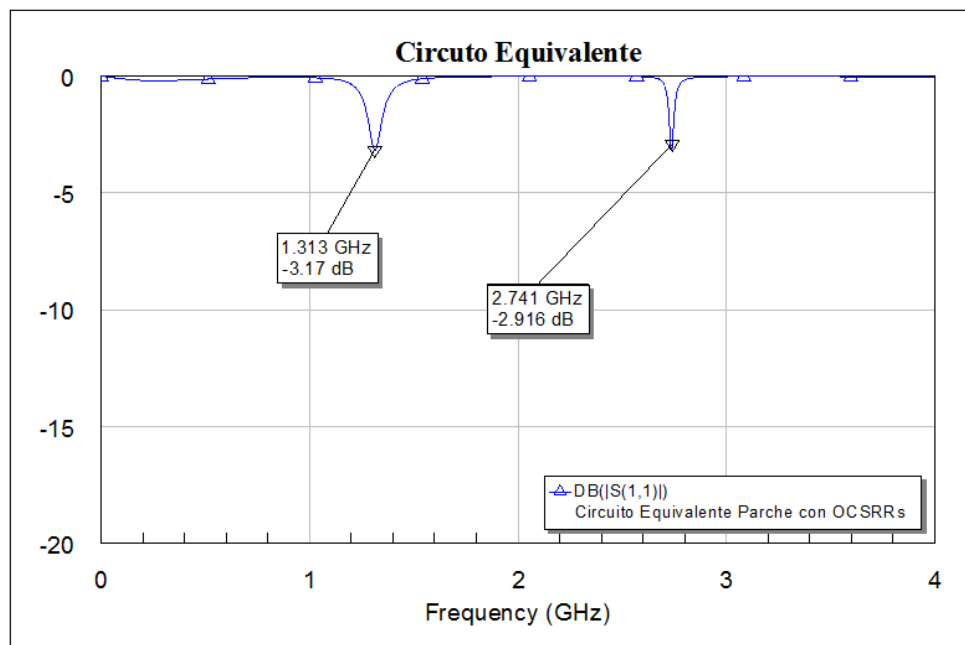


Ilustración 68. Parámetro s_{11} obtenido tras simular el modelo equivalente circuital

El motivo por el que no están muy bien adaptadas es porque los valores dados a las bobinas y condensadores son aproximados y no exactos.

3.3 Resultados de simulación

Simulando para los valores indicados anteriormente para el diseño del parche, obtenemos los resultados que se pueden ver en las siguientes imágenes:

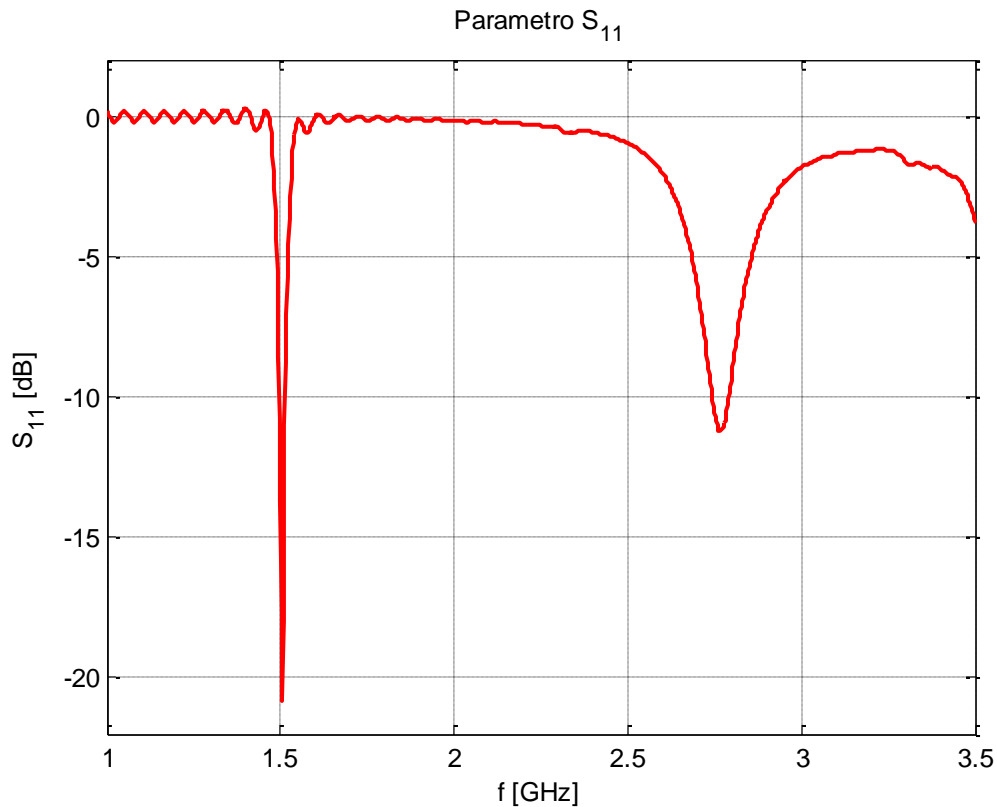


Ilustración 69. Parámetro $|S_{11}|$ para el parche cargado con 4OCSRRs

En primer lugar vemos la representación del parámetro $|S_{11}|$. Podemos ver como siguen apareciendo dos frecuencias con una buena adaptación. Para la primera de ellas correspondiente a la fundamental del parche observamos que se encuentra en 1.5GHz comprobando que ahora se encuentra en una frecuencia menor de funcionamiento dado que hemos modificado las dimensiones del parche interno haciendo que resuene el parche externo que al ser de mayores dimensiones este conlleva una frecuencia de funcionamiento menor. Podemos ver que tiene una buena adaptación siendo el valor de la misma de -20.82dB. La segunda frecuencia se encuentra ahora en 2.76GHz sufriendo también una modificación con respecto a la obtenida en el capítulo anterior debido a los cambios realizados en las dimensiones de la antena. Su adaptación en este caso es de -11.23dB.

El ancho de banda para la frecuencia de 1.5GHz abarca de 1.49GHz a 1.51GHz obteniendo de este modo un ancho de banda relativo de 1.91%. La segunda va de 2.69GHz a 2.8GHz obteniendo en este caso un ancho de banda de 5.26%.

A continuación se puede ver el diagrama de radiación en 3D que como puede verse radia en broadside como cabía esperar para la frecuencia de radiación del parche. Vemos que se obtiene para esta frecuencia 6.27dB de directividad y una ganancia de 4.87dB.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSR

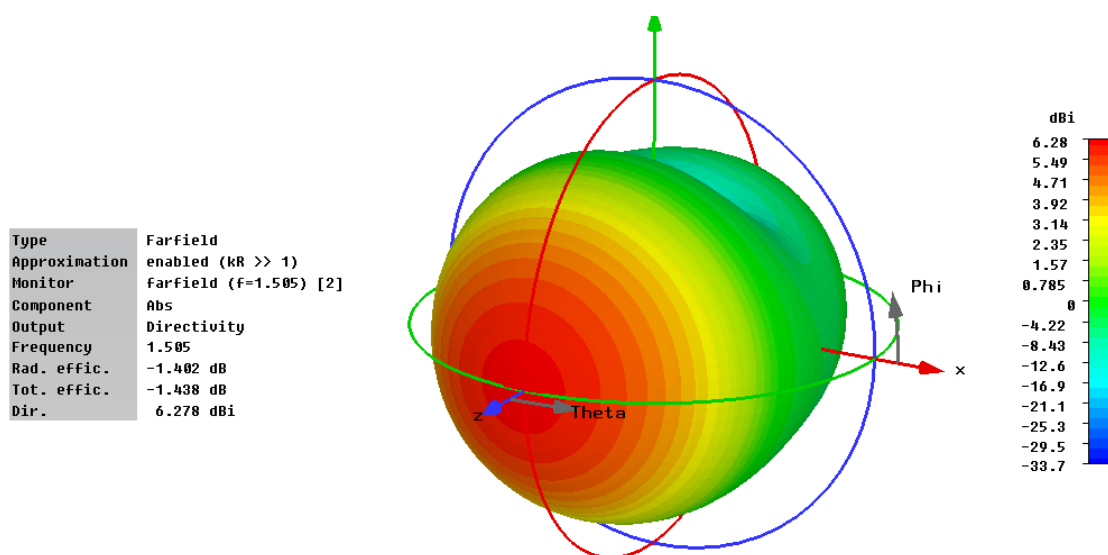


Ilustración 70. Diagrama de Radiación para la frecuencia 1.5GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde vemos que la componente contrapolar alcanza un valor máximo de -12dB en el plano E y de -12dB en el plano H siendo un poco elevados de componente contrapolar.

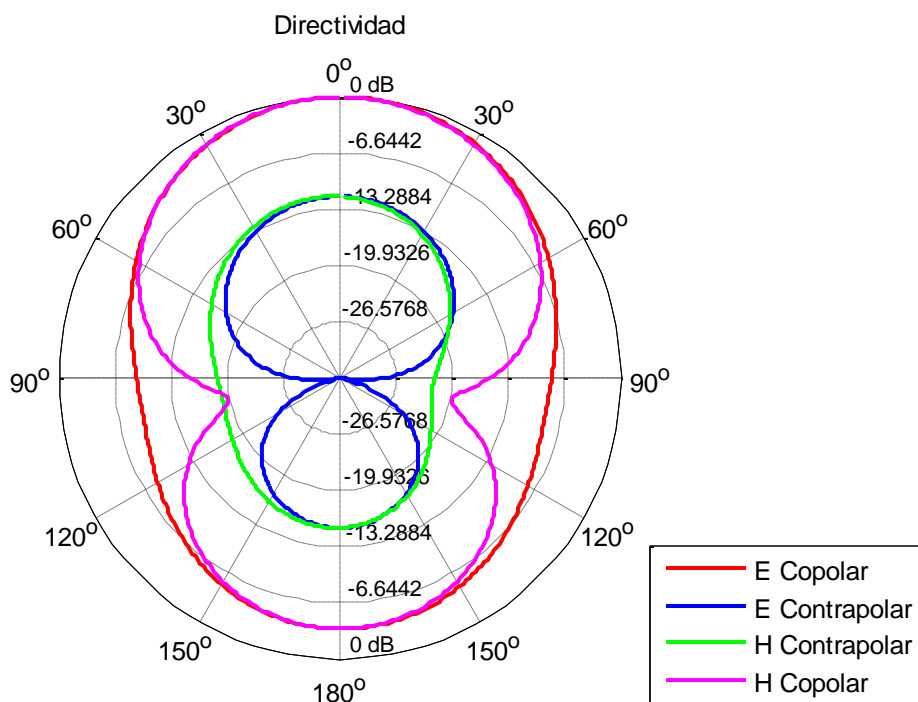


Ilustración 71. Diagrama de radiación del parche en polaresm planos E y H con 4 OCSRrs en 1.5GHz

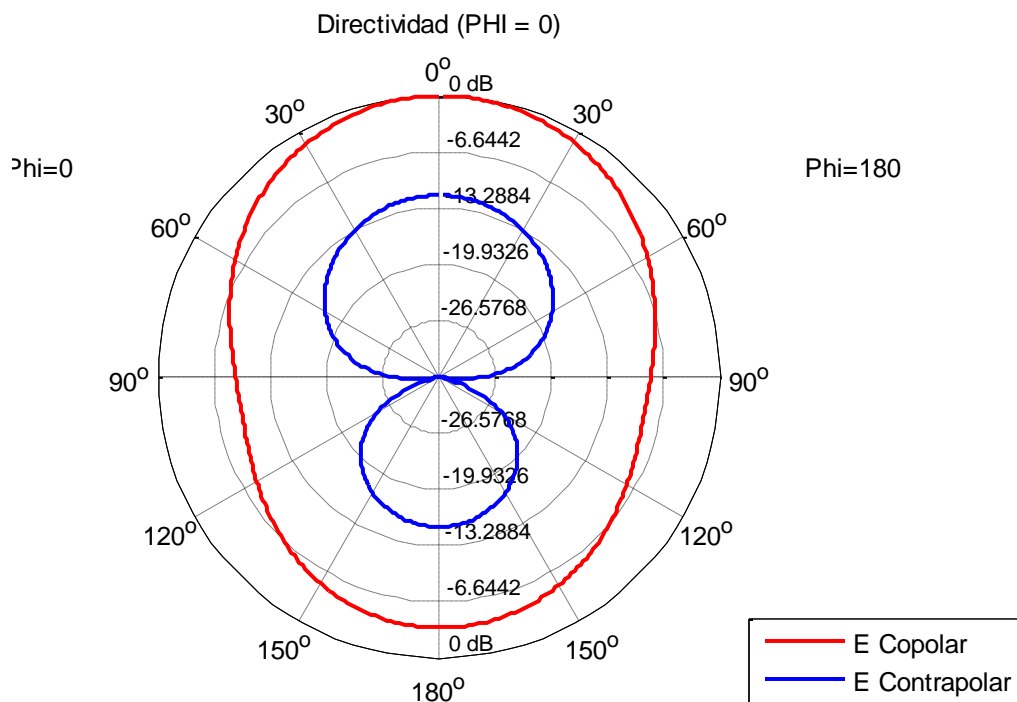


Ilustración 72. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 1.5GHz plano E

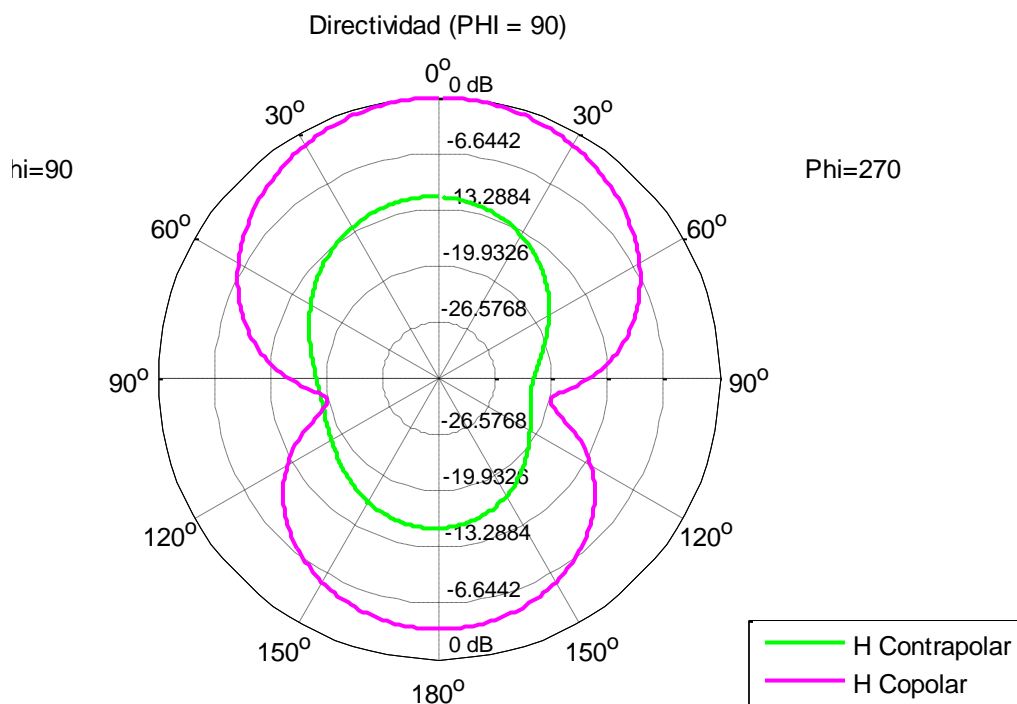


Ilustración 73. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 1.5GHz plano H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

En las siguientes imágenes vemos la distribución de campo eléctrico y de corrientes del parche. Podemos observar por la distribución de campo que se corresponde con el modo fundamental del parche.

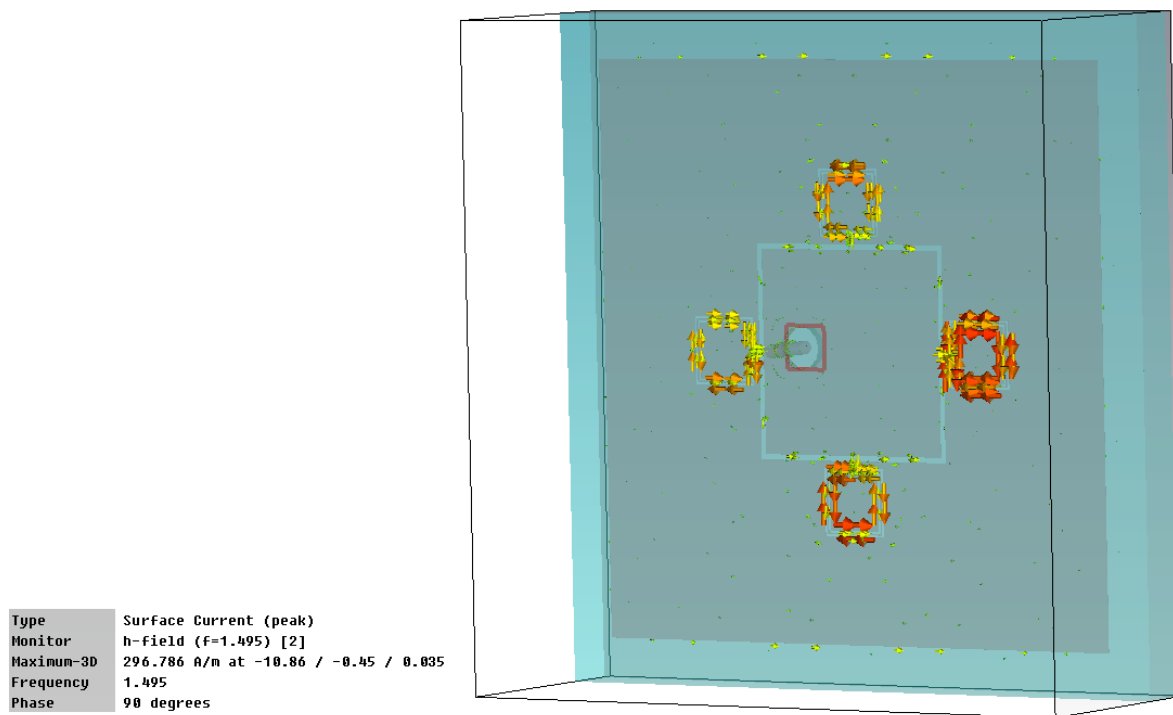


Ilustración 74. Distribución de corrientes para la frecuencia 1.5GHz

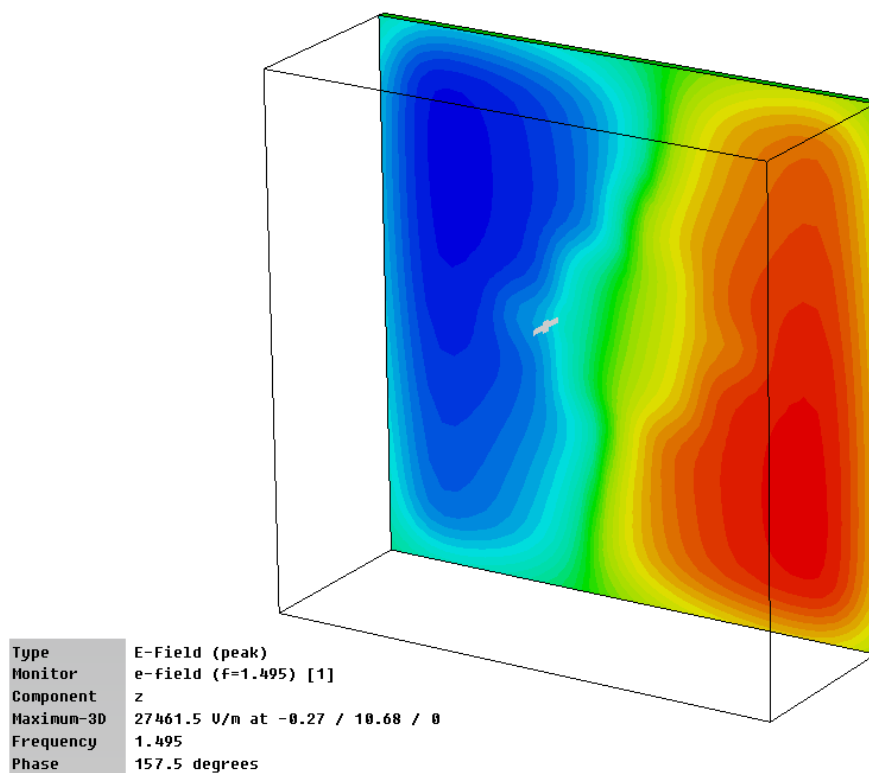


Ilustración 75. Distribución campo Eléctrico frecuencia 1.5GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Para la frecuencia de resonancia de los OCSRRs representamos el diagrama de radiación en 3D comprobando que con el nuevo diseño obtenemos el diagrama de radiación de tipo parche que es el deseado. Vemos como se alcanza una directividad de 7.81dB y una ganancia 7.8dB.

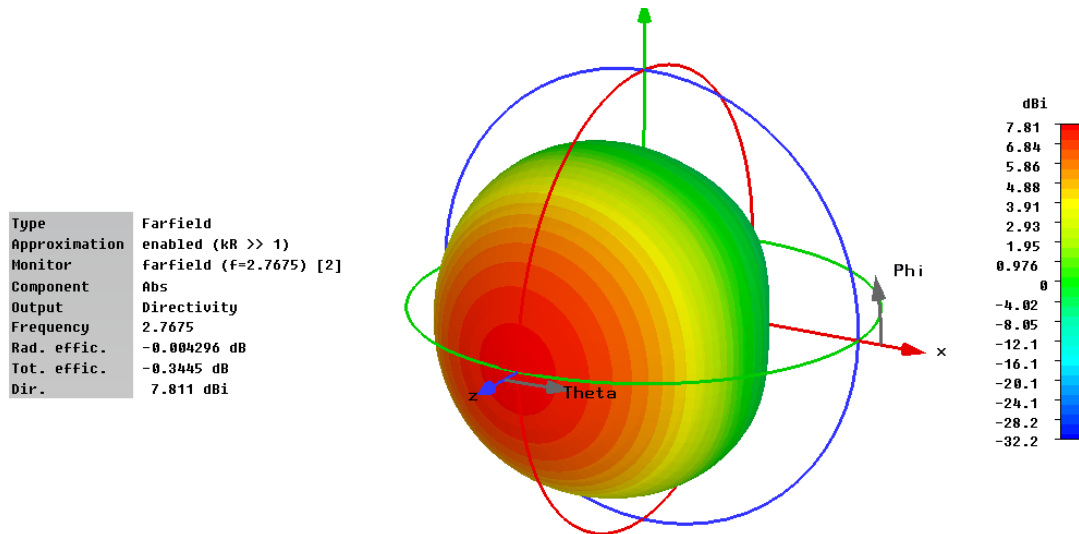


Ilustración 76. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.77GHz

Representamos al igual que en los casos anteriores el diagrama de radiación en polares donde observamos los valores que alcanzan las componentes contrapolares. En este caso vemos como para el plano E tenemos una componente contrapolar de -25dB y para el plano H es de -19dB.

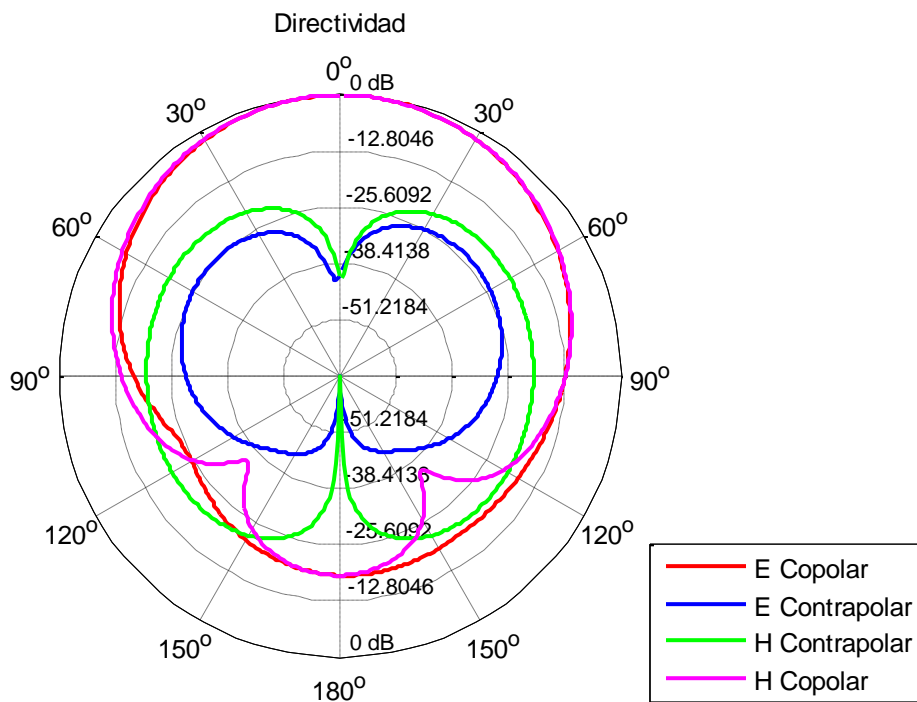


Ilustración 77. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz

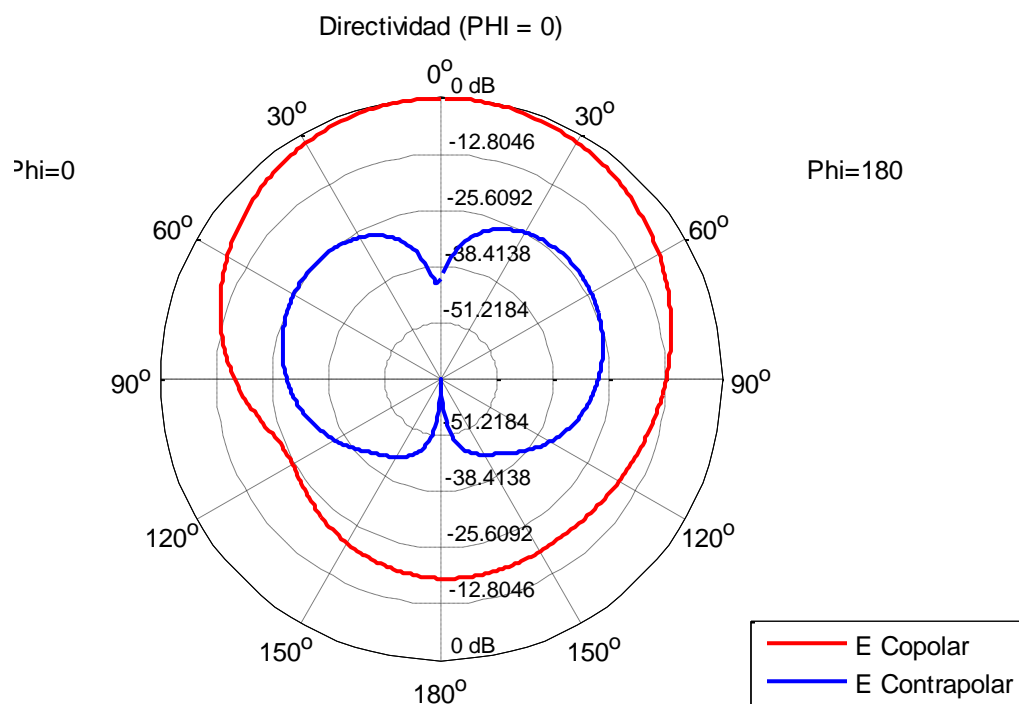


Ilustración 78. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz

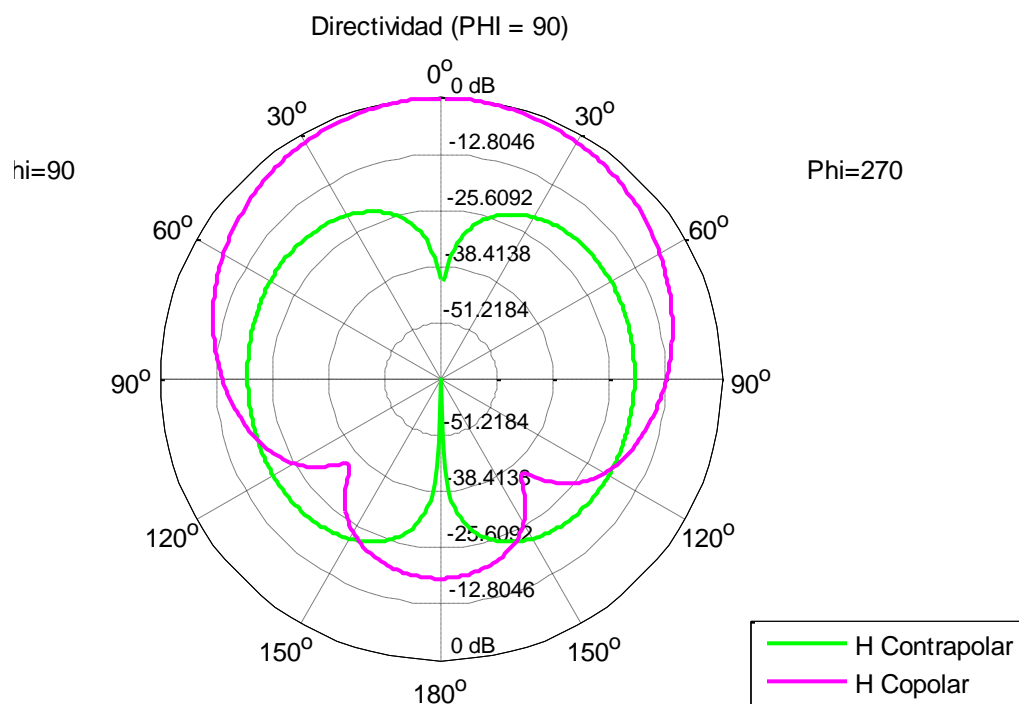


Ilustración 79. Diagrama de radiación del parche en polares con 4 OCSRRs en 2.77GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Por último vemos representados los diagramas de campo eléctrico y distribución de corrientes observando que se comportan como un modo de tipo parche (desfase de $\lambda/2$ entre los lados radiantes) tal y como se ha visto en la representación del diagrama de radiación.

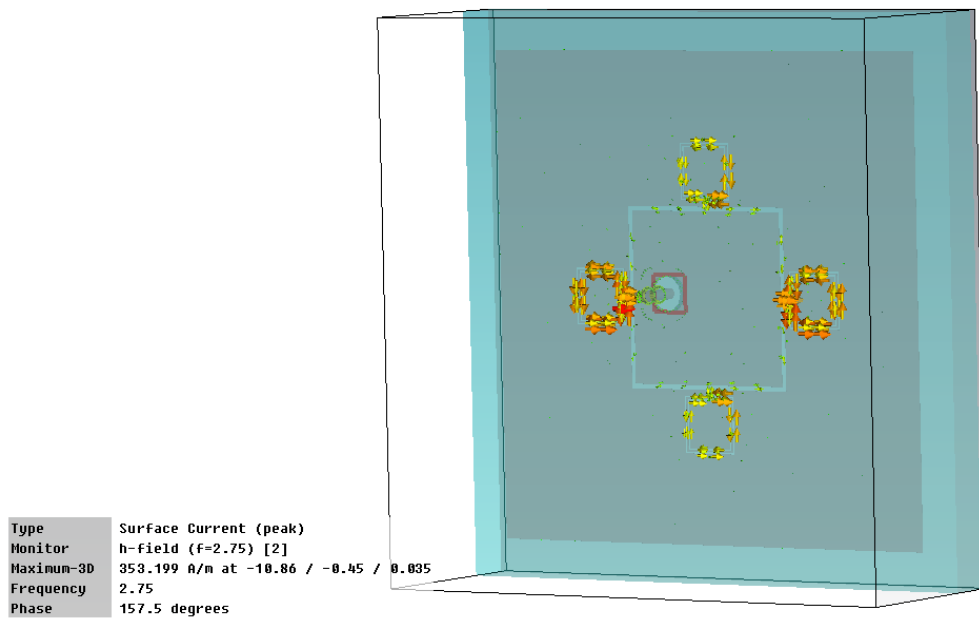


Ilustración 80. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.77GHz

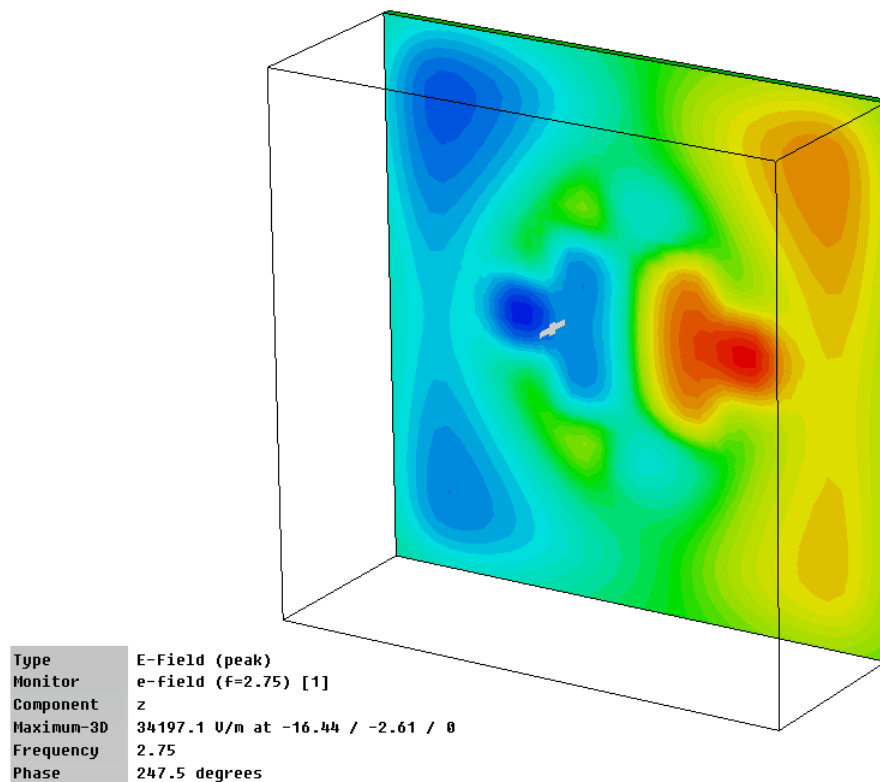


Ilustración 81. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.77GHz

-Comparativa entre el parche convencional y cargado con OCSRRs

En la siguiente gráfica podemos ver la comparativa del parámetro $|S_{11}|$ para el parche convencional diseñado para la nueva frecuencia de 1.8GHz y para el nuevo diseño del parche cargado con OCSRRs.

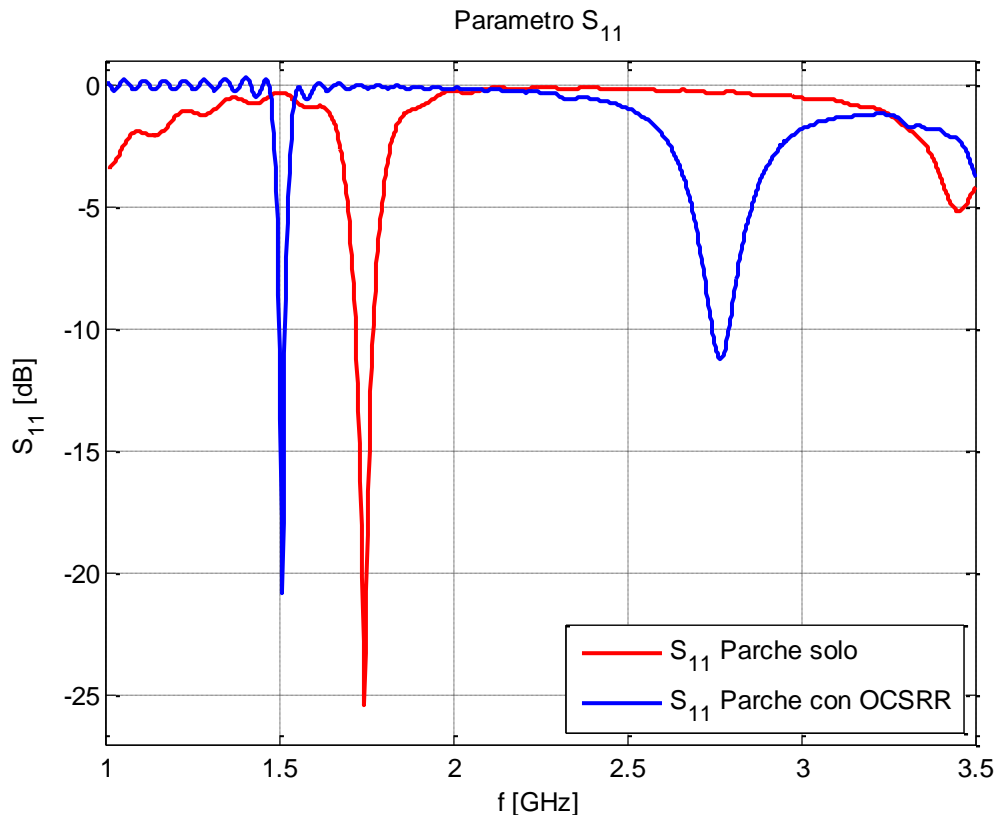


Ilustración 82. Comparativa del parámetro $|S_{11}|$ para el parche convencional y cargado con OCSRRs

Tabla 7. Comparativa del parche convencional y cargado con OCSRRs

	Frecuencia de Funcionamiento	Ancho de Banda	Diagrama de radiación
Parche convencional	1.72GHz	6.9%	Tipo Parche
Parche cargado con 4 OCSRRs	1.5GHz	1.91%	Tipo Parche
	2.76GHz	5.26%	Tipo Parche

En los resultados obtenidos para ambas simulaciones podemos observar que en la antena de parche convencional (sin estar cargada con los OCSRRs) que sólo hay una banda de frecuencia en la región de interés centrada en 1.72 GHz. Las frecuencias que se abarcan van de 1.66GHz a 1.78GHz (considerados desde $s_{11} < -6\text{dB}$) consiguiendo un ancho de banda relativo de 6.9%.

En cambio en la antena de parche cargada con los OCSRRs hay dos bandas de interés, la primera con 1.91% de ancho de banda relativo centrado en 1.5GHz, considerado también desde $s_{11} < -6\text{dB}$.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Del mismo modo la segunda frecuencia está centrada en 2.76GHz dando lugar a un 5.26% de ancho de banda relativo. La frecuencia de la primera resonancia es la producida por el parche y está por debajo de la frecuencia de resonancia del parche convencional debido al comportamiento inductivo de los OCSRRs bajo esta frecuencia. La segunda resonancia aparece a la frecuencia de resonancia de los OCSRRs.

También podemos ver que están adaptadas en ambos casos, consiguiendo para el parche convencional una adaptación -25.1dB y para el parche cargado con OCSRRs conseguimos en la frecuencia inferior de funcionamiento una adaptación de -21.12 dB y para la frecuencia superior una adaptación de -12.76 dB.

Además de comparar el ancho de banda obtenido con ambos parches, también es necesario comprobar que ambos estén funcionando con diagramas de radiación similares. En el caso que nos ocupa, se puede comprobar que en ambos casos el parche está funcionando en el modo fundamental; así mismo también podemos ver que a la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs el parche tiene también un diagrama de radiación parecido al del tipo parche.

En vista de los datos obtenidos, podemos concluir que el parche mantiene el mismo comportamiento en ambos casos, pero en cuanto al ancho de banda relativo vemos cómo se ve reducido considerablemente pasando de 6.9% a un 1.91%. En cuanto al ancho de banda relativo de los OCSRRs podemos ver que es algo más del doble del obtenido para el parche a su frecuencia fundamental. Lo mismo ocurre en cuanto a la adaptación viéndose que se consigue una peor adaptación en el caso del parche cargado con las partículas resonantes.

En cuanto al diagrama de radiación y distribución de campo eléctrico, podemos ver que el parche está funcionando bien a su frecuencia de resonancia y que los OCSRRs también funcionan con un diagrama broadside como deseábamos.

3.4 Estudio paramétrico

En este apartado se va a realizar un estudio paramétrico para mostrar así como varían las frecuencias de funcionamiento del parche en función de los parámetros del parche. De este modo a partir de este estudio realizado si se desean cambiar las frecuencias de funcionamiento a otras de más utilidad para determinados de telecomunicaciones servirá de guía para hacer la transformación de las frecuencias.

En primer lugar se realizará el estudio dejando fijos todos los parámetros excepto la longitud del parche exterior. Vemos que si modificamos la longitud del parche externo modificaremos su frecuencia de funcionamiento consiguiendo una frecuencia más elevada para una longitud más pequeña y de igual forma conseguimos una menor frecuencia de funcionamiento para una longitud mayor del lado del parche. En nuestro diseño no podemos comprobar el caso de una longitud mayor del parche debido al poco margen que queda porque nos encontramos muy cerca del borde del sustrato. En nuestro caso comprobamos al ver los resultados obtenidos que también se desplaza proporcionalmente la frecuencia de resonancia de los OCSRRs a la par que la del parche.

Podemos ver también que mejora la adaptación cuanto más pequeño es el tamaño del parche externo para su frecuencia de funcionamiento, manteniéndose igual en cuanto a adaptación se refiere la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs.

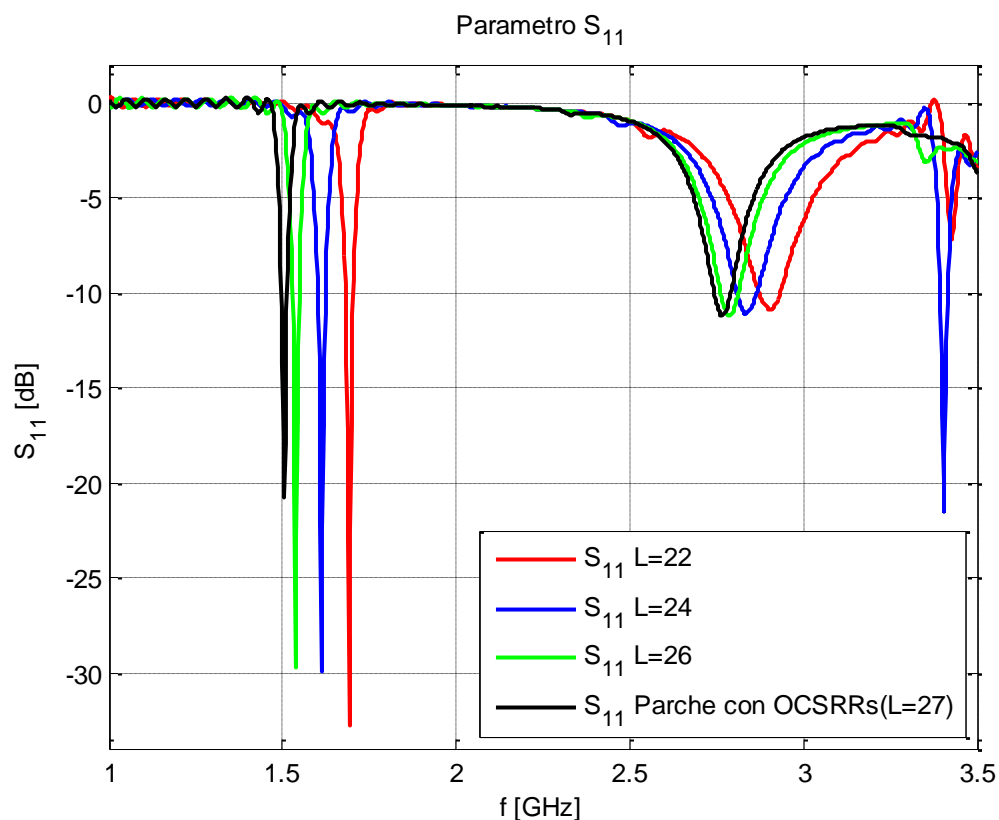


Ilustración 83. Variación del parámetro $|S_{11}|$ cambiando la longitud del parche externo

En el segundo estudio se fijan todos los parámetros y se varía únicamente la longitud de las partículas resonantes. Se comprueba como puede verse en la representación del parámetro $|S_{11}|$ que si modificamos la longitud externa de las partículas OCSRRs pasa lo mismo que en el caso anterior, consiguiendo que funcionen a una frecuencia más elevada para una longitud menor y para una mayor funcionen a una frecuencia menor. En este caso como cabía esperar la frecuencia debida al parche externo no se ve afectada por la variación de este parámetro manteniéndose prácticamente fija para todos los valores.

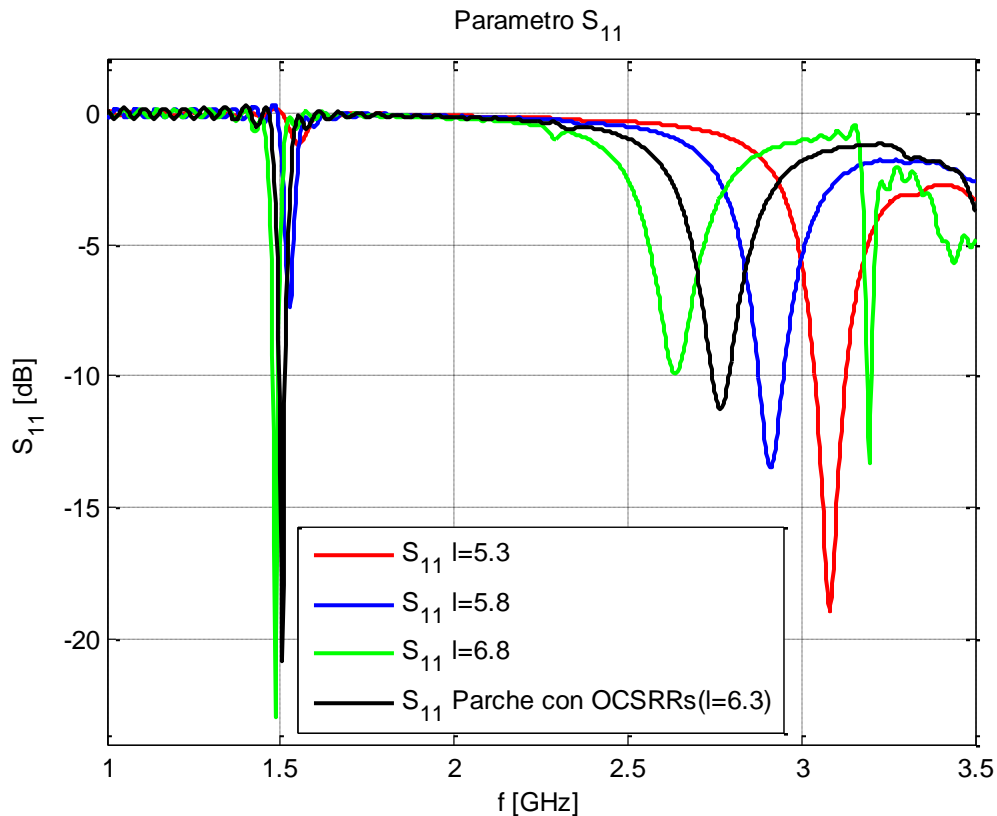


Ilustración 84. Variación del parámetro $|S_{11}|$ cambiando la longitud de los OCSRRs

Además de los efectos causados al variar los parámetros que afectan al funcionamiento en una u otra frecuencia se va a comentar también el efecto que produciría en nuestras frecuencias si cambiásemos otros valores de las dimensiones del parche:

1. Si modificamos el ancho del sustrato veremos modificaciones tanto en la adaptación de las frecuencias como en el valor de la frecuencia de funcionamiento que se podrá desplazar levemente. Cuanto más ancho es el sustrato las frecuencias son más bajas, del mismo modo cuanto más estrecho las frecuencias son más altas.
2. Si modificamos el punto de alimentación del parche se observan variaciones en la adaptación de las frecuencias pudiendo además verse desplazado levemente el valor de la frecuencia de funcionamiento.
3. Si modificamos la longitud del parche interno a los OCSRRs podemos observar que al aumentar su tamaño la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs es más alta mientras que al reducir su tamaño se reduce el valor de dicha frecuencia de funcionamiento.

3.5 Resultados Experimentales

La antena tipo parche analizada en el paso anterior, fue construida como puede verse en la siguiente imagen:

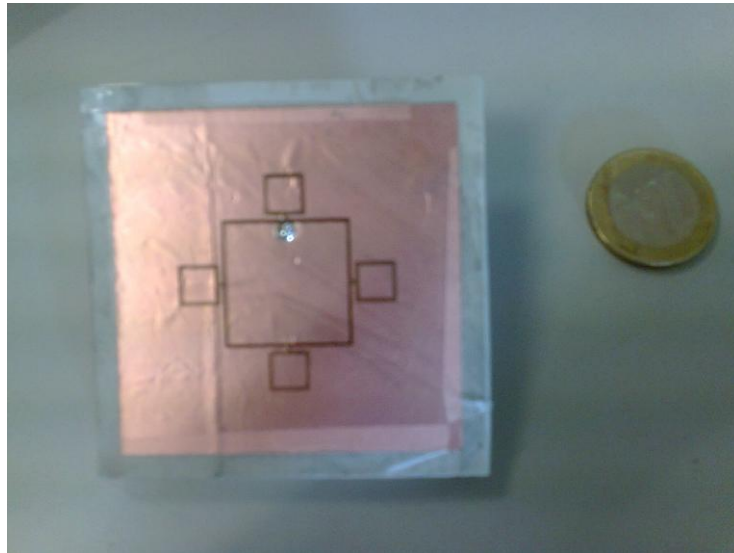


Ilustración 85. Parche fabricado

A continuación se muestra el parámetro $|S_{11}|$ obtenido con CST junto a la representación de los resultados experimentales obtenidos:

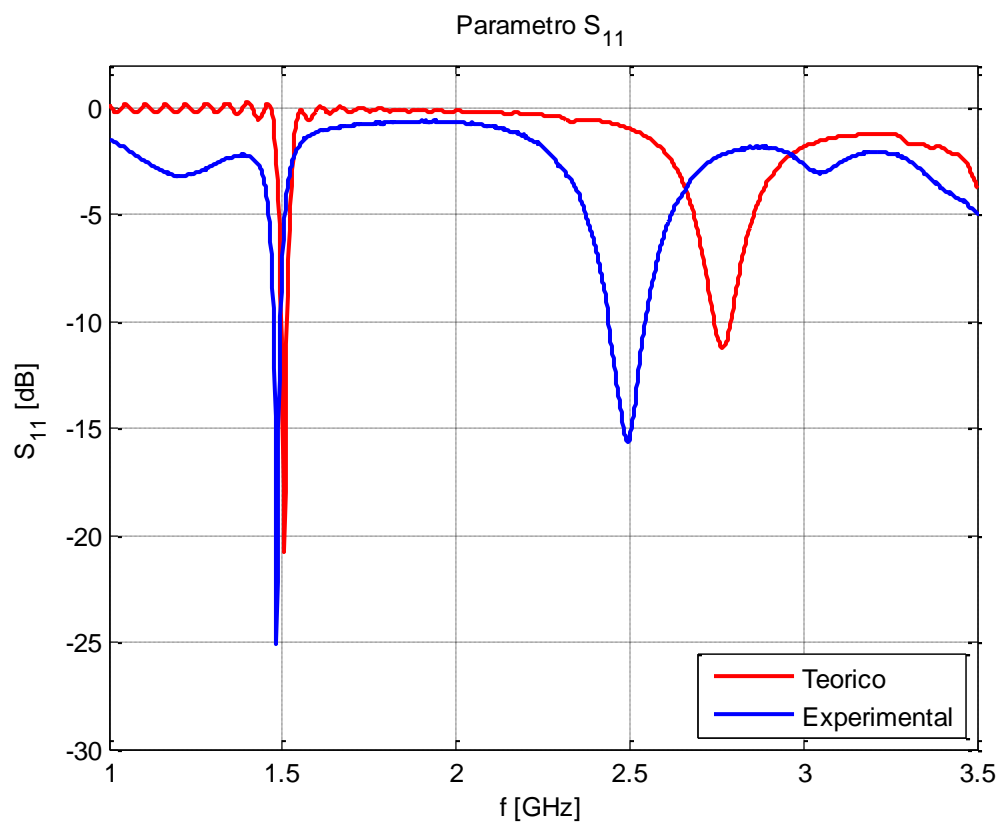


Ilustración 86. Parámetro $|S_{11}|$ para los resultados simulados y experimentales del parche con 4 OCSRRs

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Tabla 8. Resultados experimentales y teóricos del primer parche fabricado

	Frecuencia de Funcionamiento	Ancho de Banda	Diagrama de Radiación
Experimentales	1.48GHz	2.76%	Tipo Parche
	2.5GHz	8.4%	Tipo Parche
Teóricos	1.5GHz	1.91%	Tipo Parche
	2.76GHz	5.26%	Tipo Parche

Podemos ver comparando los resultados obtenidos con el CST con los experimentales que las frecuencias sufren un pequeño desplazamiento hacia frecuencias más bajas pasando la inferior de 1.5GHz a 1.48GHz y la superior de 2.76GHz a 2.5GHz. Esta pequeña variación puede deberse a la tolerancia de la permitividad dado que el sustrato empleado en la construcción de la antena ha sido polipropileno, cuya permitividad no conocemos de forma exacta, ya que la que empleamos en las simulaciones es un valor orientativo pero no el exacto del material en cuestión.

Para el cálculo de los anchos de banda relativos para los resultados experimentales podemos ver que hay dos bandas de interés, la primera abarca de 1.46GHz a 1.5GHz, considerados también desde $S_{11} < -6\text{dB}$, lo que supone un 2.76% de ancho de banda relativo centrado en 1.48GHz. Del mismo modo la segunda frecuencia abarca desde 2.39GHz a 2.6GHz y está centrada en 2.5GHz dando lugar a un 8.4% de ancho de banda relativo. Podemos ver como el ancho de banda ha mejorado con respecto a lo que habíamos obtenido en simulación, especialmente hemos obtenido un aumento mayor del ancho de banda en la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs.

También podemos ver que ha mejorado considerablemente la adaptación, consiguiendo en la frecuencia baja de funcionamiento una adaptación de -25.09 dB y para la frecuencia superior una adaptación de -15.27 dB. Por lo que vemos que se encuentra perfectamente adaptada para ambas frecuencias.

A continuación se van a mostrar los cortes de los diagramas de radiación obtenidos de forma experimental:

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

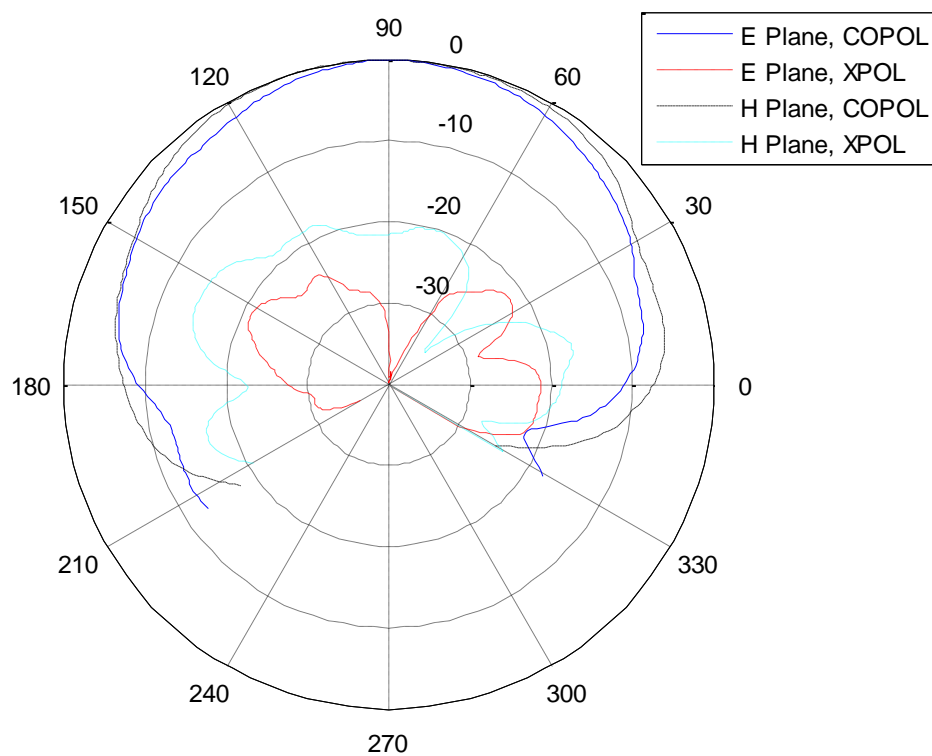


Ilustración 87. Diagrama de radiación a frecuencia de 1.48GHz planos E y H

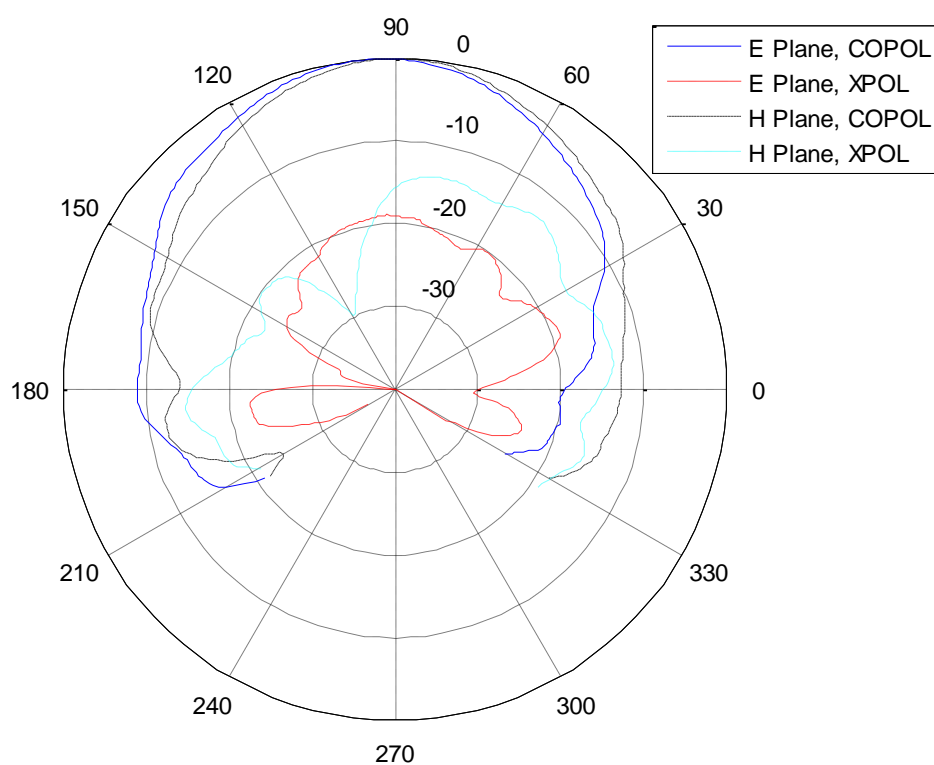


Ilustración 88. Diagrama de radiación a frecuencia de 2.5GHz planos E y H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Al observar los diagramas de radiación obtenidos comprobamos que el parche está radiando con diagrama broadside a las dos frecuencias, como cabía esperar. Podemos ver que para la frecuencia inferior obtenemos un valor de componente contrapolar máximo -15dB en el plano H por lo que el resto de valores se encuentran por debajo de este valor, y en el punto de máxima radiación contamos con un valor de componente contrapolar de -22dB en el plano E.

Para la segunda frecuencia observamos un valor máximo de componente contrapolar de -16dB en el plano H y -19dB para el plano E. De este modo conseguimos unos valores de componente contrapolar aceptables.

También podemos comprobar que el parche radia en modo broadside para ambas frecuencias tal y como se esperaba y que coincide con las simulaciones realizadas.

4 ANTENA DE PARCHÉ CORTOCIRCUITADO CARGADA CON CUATRO OCSRRS

En este último capítulo se va a explicar el diseño de un nuevo parche. Dado que se obtuvo una antena que funcionaba a dos frecuencias, se decidió crear un nuevo parche que funcionase a tres frecuencias añadiendo un cortocircuito que hará que a la frecuencia de funcionamiento adicional debida al corto, el parche radie con tipo de radiación monopolar (diagrama de radiación en anillo con un nulo en el centro). Este modo de funcionamiento resulta útil por ejemplo para un router donde interesa tener un nulo en el centro y que tenga un plano omnidireccional.

Primero se expondrán los valores del nuevo diseño junto las modificaciones realizadas en el diseño anterior para obtener el funcionamiento en triple frecuencia. Posteriormente se mostrarán los resultados obtenidos en simulación, junto con un estudio paramétrico realizado. Se hará una comparativa con el diseño anterior obtenido, el parche convencional y un diseño en anillo.

Finalmente para concluir se mostrará la antena construida junto con los resultados obtenidos experimentalmente que se compararán también con los obtenidos teóricamente al simular la antena, comentándose las diferencias observadas al igual que se hizo en el capítulo anterior.

4.1 Descripción de la antena

El parche diseñado funciona en tres bandas, una debida al parche completo externo que es el que funciona a la frecuencia inferior, otra debida al corto introducido mediante la inserción de un cilindro en la zona central de la estructura que se corresponde con la frecuencia intermedia, y otra debida a los OCSRRs cuya frecuencia de funcionamiento se corresponde con la frecuencia superior.

A la hora de diseñar el parche, en primer lugar se empleó un puerto discreto para modelar la alimentación coaxial no consiguiendo la adaptación correcta de la frecuencia inferior con este tipo de alimentación por lo que se optó por el empleo de una línea microstrip en medio del sustrato para alimentar el parche (alimentación por aproximación explicada en la introducción), consiguiendo con esta nueva alimentación una buena adaptación para las tres frecuencias.

Mediante simulación partiendo de los datos anteriores, se han establecido los valores de los parámetros para que el parche funcione a la frecuencia deseada mostrándose en la tabla siguiente:

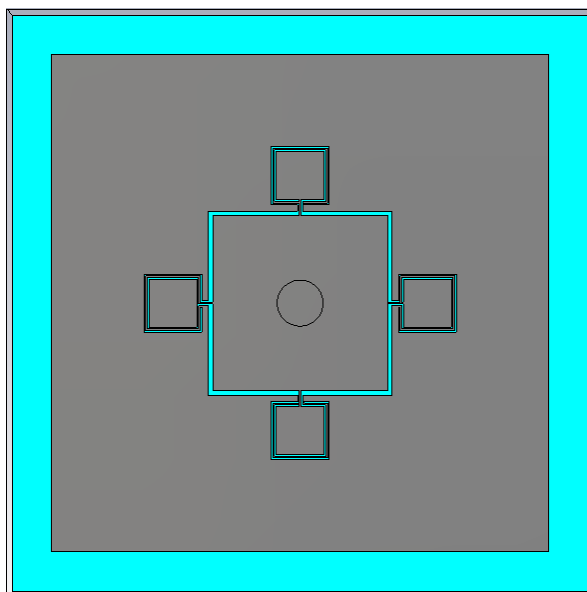


Ilustración 89. Parche cargado con OCSRRs y cilindro en el centro para el cortocircuito

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Tabla 9. Medidas y materiales del diseño del parche

	MATERIAL	PARÁMETRO	VALOR
SUSTRATO	PP	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Alto	4mm
PLANO DE MASA	PEC	Largo	62.5mm
		Ancho	62.5mm
		Alto	1mm
PARCHE CUADRADO EXTERNO	PEC	Largo	54mm
		Espesor metal	0.035mm
PARCHE CUADRADO INTERNO	PEC	Largo	19.5mm
		Espesor metal	0.035mm
ALIMENTACIÓN	Posición comenzando desde el extremo del lado del dieléctrico	Largo	24.5mm
		Ancho	3.2mm
		Alto	0.035mm
Cilindro para generar el cortocircuito	Colocado en el centro	Largo	4.035mm
		Radio	5mm

Los OCSRRs siguen siendo los mismos de la estructura diseñada en el Capítulo 3, mostrándose de nuevo sus dimensiones en la tabla 10:

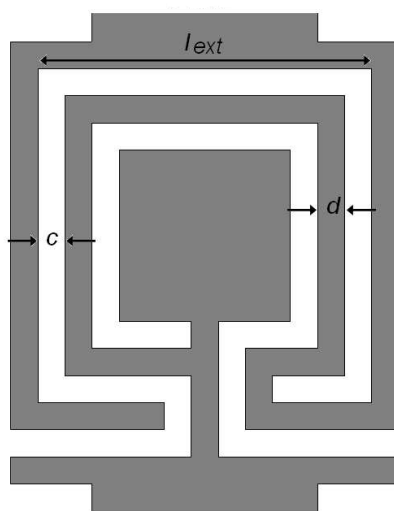


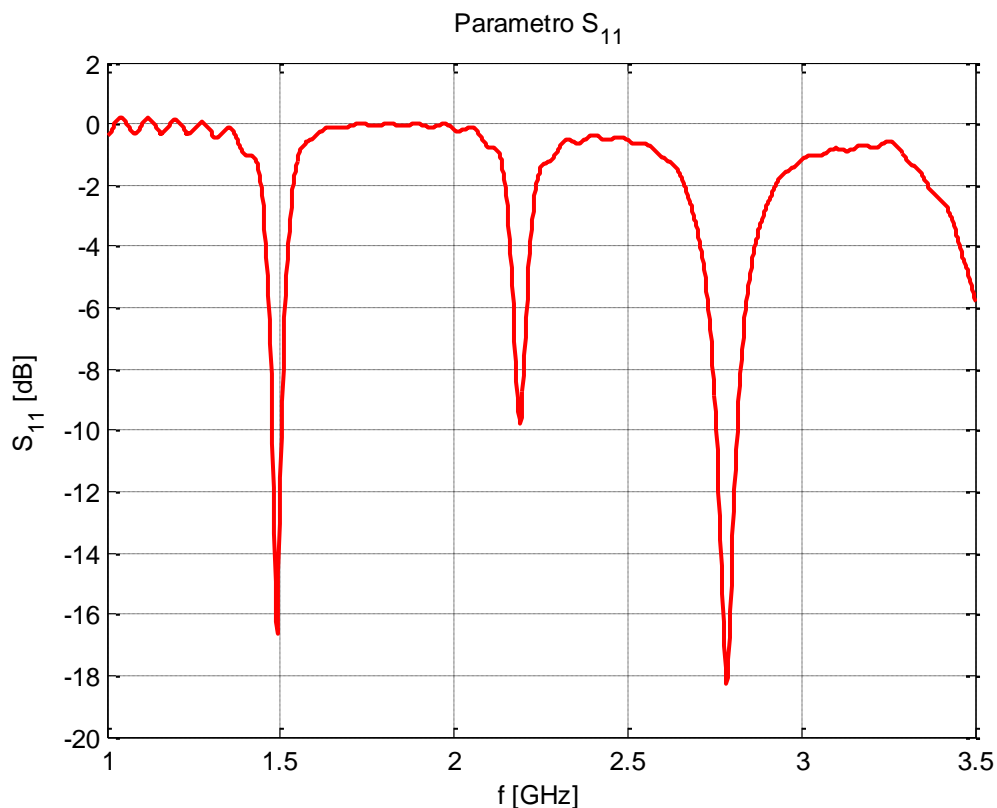
Ilustración 90. Diseño OCSRR

Tabla 10. Parámetros de diseño de los OCSRRs

Largo del OCSRR (l_{ext})	6.3mm
Huecos de los OCSRRs (c)	0.18mm
Grosor de la metalización (d)	0.18mm
Distancia del centro del parche a los OCSRRs	20.18mm (19.5+g+c)
Gap (g) que separa el parche interno del OCSRR	0.5

4.2 Resultados de simulación

Simulando para los valores indicados anteriormente los resultados obtenidos se pueden ver en las siguientes imágenes:

Ilustración 91. Parámetro $|S_{11}|$ para el parche con 4 OCSRRs y un cortocircuito

En primer lugar vemos la representación del parámetro $|S_{11}|$. Podemos ver como ahora obtenemos un funcionamiento en triple frecuencia con una buena adaptación. Para la primera de ellas correspondiente a la fundamental del parche observamos que se encuentra en 1.49GHz comprobando que se ha desplazado de nuevo levemente con respecto a la obtenida en el caso anterior, su adaptación es de -16.9dB. La segunda frecuencia, que se corresponde con la del cortocircuito, se encuentra en 2.19GHz. Su adaptación en este caso es de -10dB. Para la tercera

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

frecuencia correspondiente a la de los OCSRRs podemos ver que se encuentra centrada en 2.78GHz obteniendo una adaptación de -18.2dB.

El ancho de banda para la frecuencia de 1.49GHz abarca de 1.46GHz a 1.51GHz obteniendo de este modo un ancho de banda relativo de 3.38%. La segunda va de 2.16GHz a 2.21GHz obteniendo en este caso un ancho de banda de 1.97%. La tercera y última tiene un ancho de banda de 3.94% que abarca de 2.73GHz a 2.84GHz.

A continuación se puede ver el diagrama de radiación en 3D que como puede verse radia en broadside como cabía esperar para la frecuencia de radiación del parche. Vemos que se obtiene para esta frecuencia 6.07dB de directividad y una ganancia de 2.55dB.

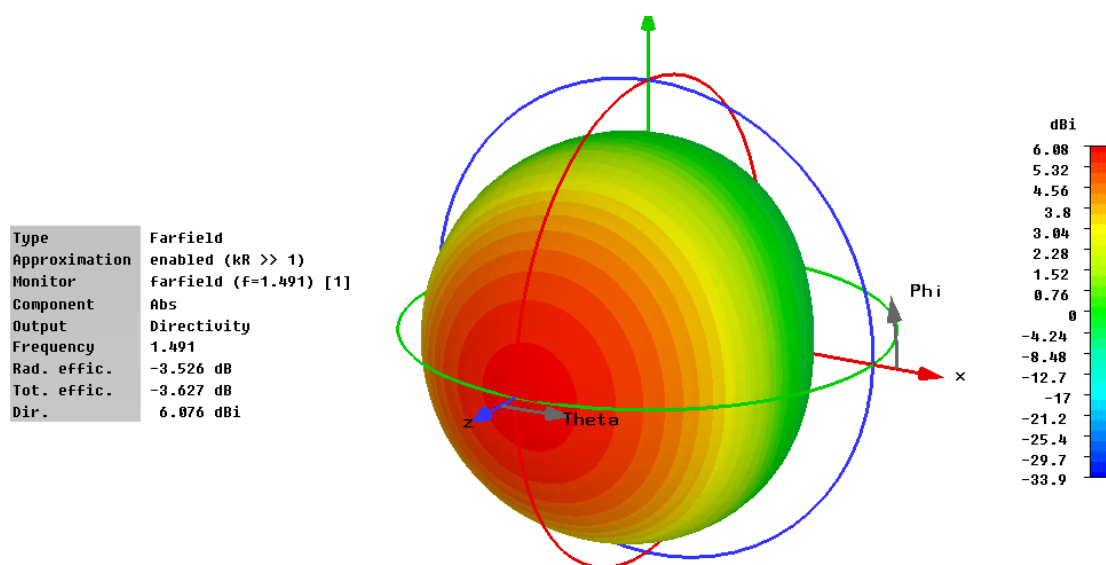


Ilustración 92. Diagrama de Radiación para la frecuencia 1.49GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde vemos que la componente contrapolar alcanza un valor de -32.4dB en el plano E y un valor de -20dB en el plano H siendo un valor adecuado de componente contrapolar.

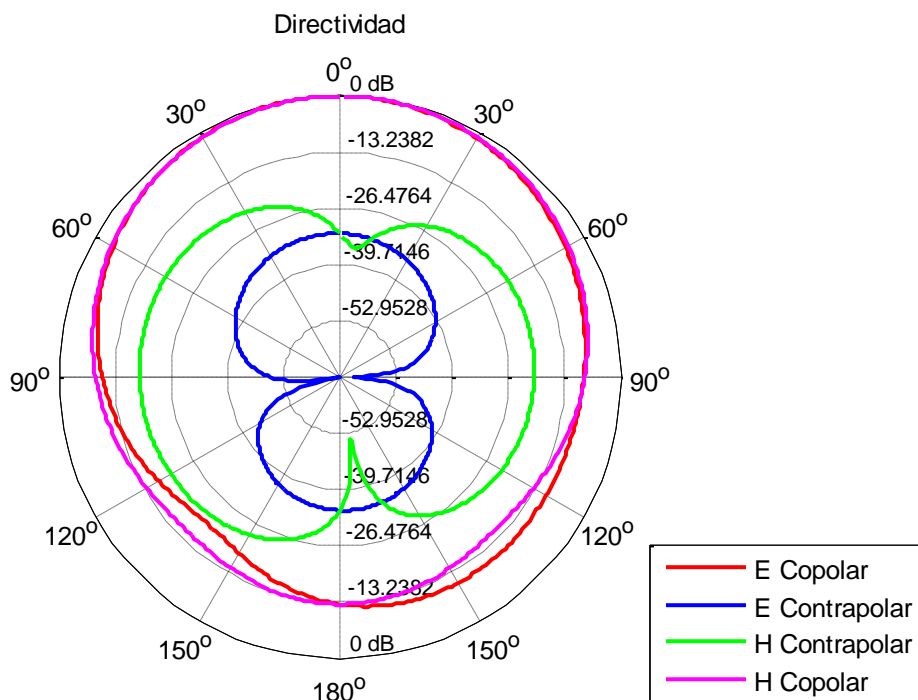


Ilustración 93. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 1.49GHz

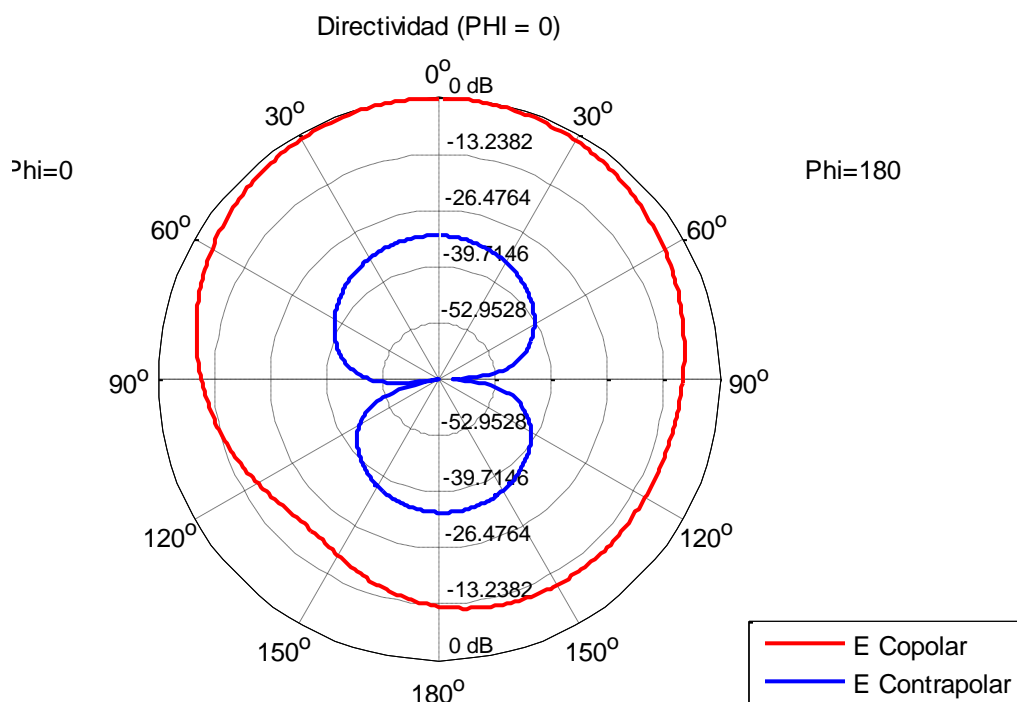


Ilustración 94. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 1.49GHz plano E

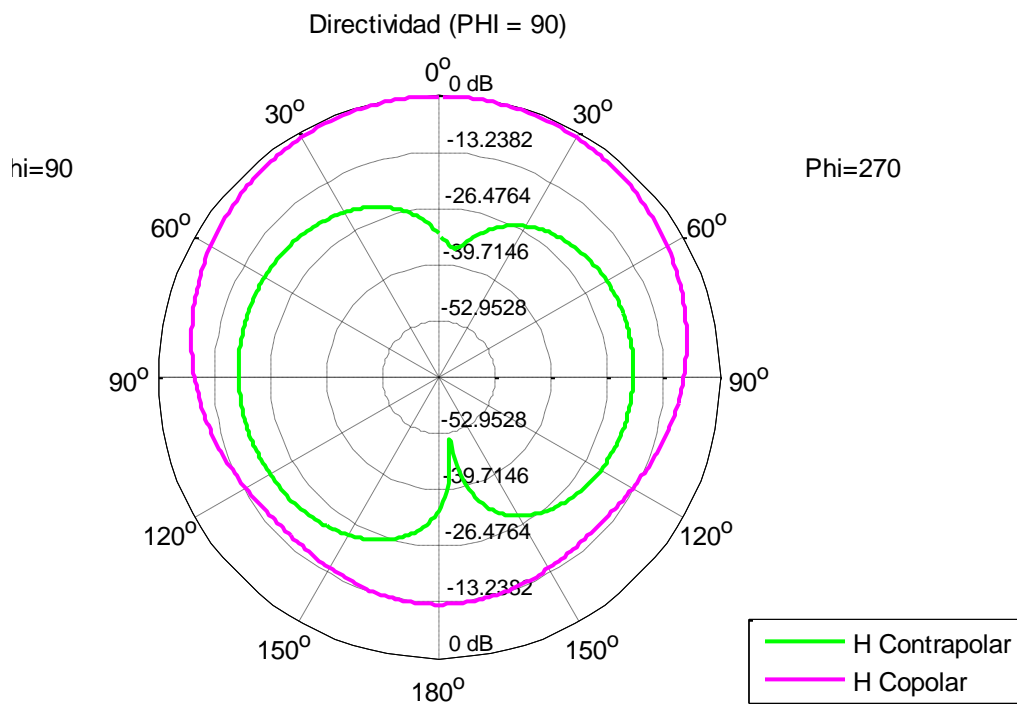


Ilustración 95. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 1.49GHz plano H

En las siguientes imágenes vemos la distribución de campo eléctrico y de corrientes del parche. Podemos observar por la distribución de campo que se corresponde con el modo tipo parche.

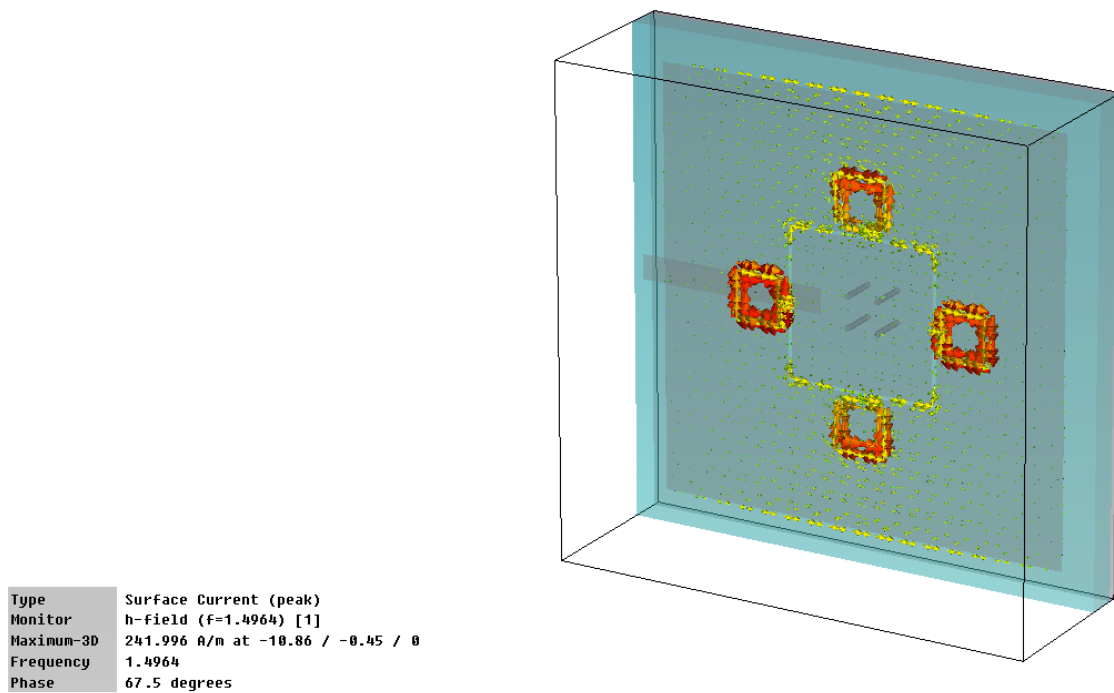


Ilustración 96. Distribución de corrientes para la frecuencia 1.49GHz

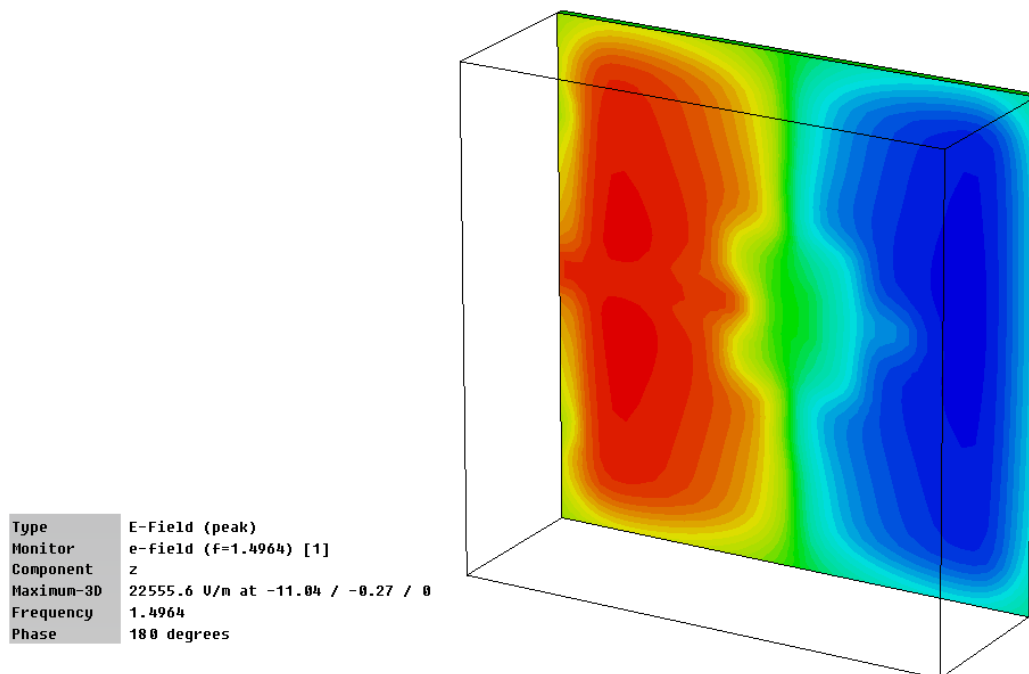


Ilustración 97. Distribución campo Eléctrico frecuencia 1.49GHz

Para la segunda frecuencia de resonancia se representa el diagrama de radiación en 3D comprobando que se obtiene un modo de campo eléctrico constante propio de un parche cortocircuitado. Vemos como se alcanza una directividad de 1.88dB y una ganancia -0.39dB.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

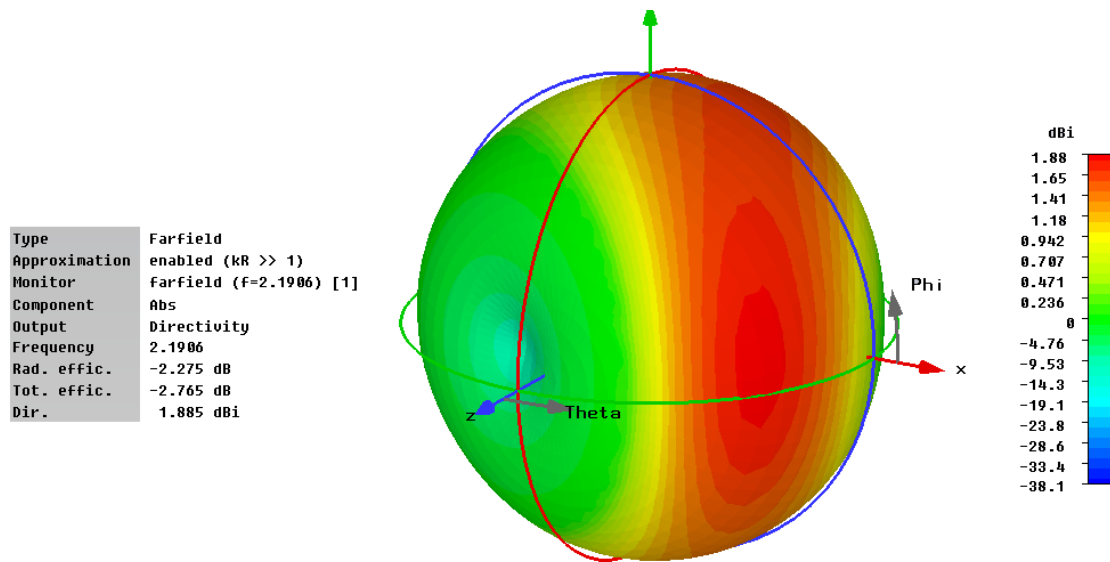


Ilustración 98. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.15GHz

También se representa el diagrama de radiación en polares donde podemos ver el corte en plano E y plano H y donde vemos que la componente contrapolar alcanza un valor de -16dB en el plano E y -19.6dB en el plano H siendo un valor adecuado de componente contrapolar.

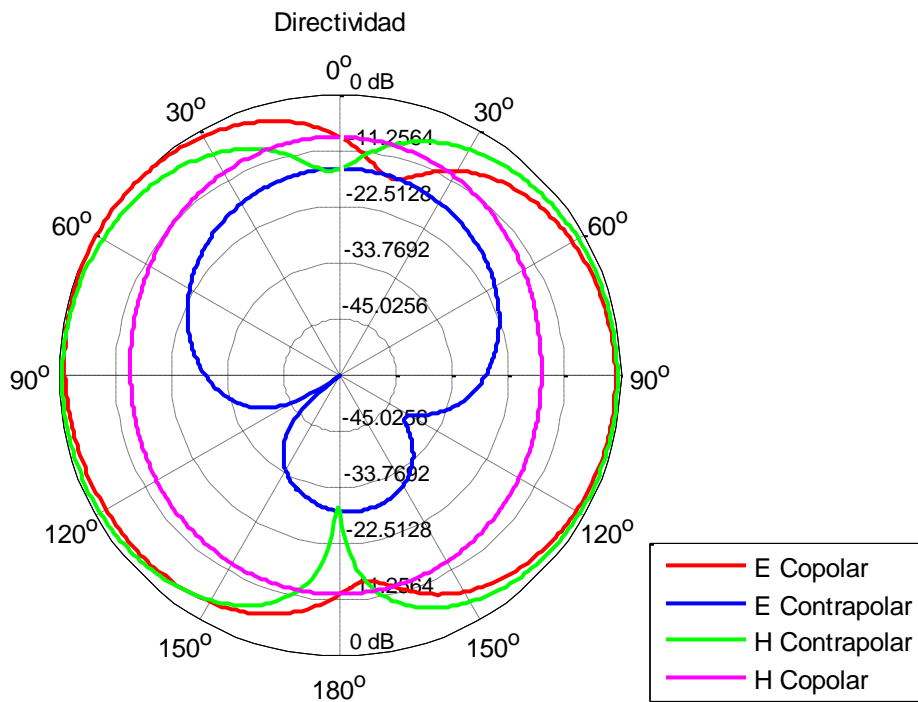


Ilustración 99. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 2.15GHz

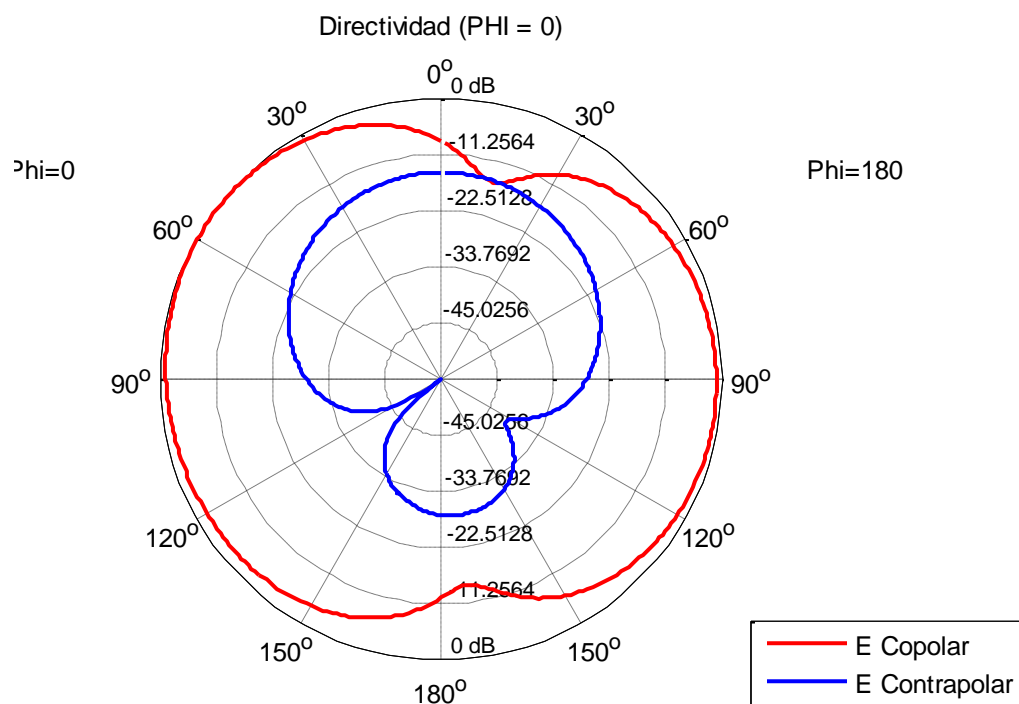


Ilustración 100. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.15GHz plano E

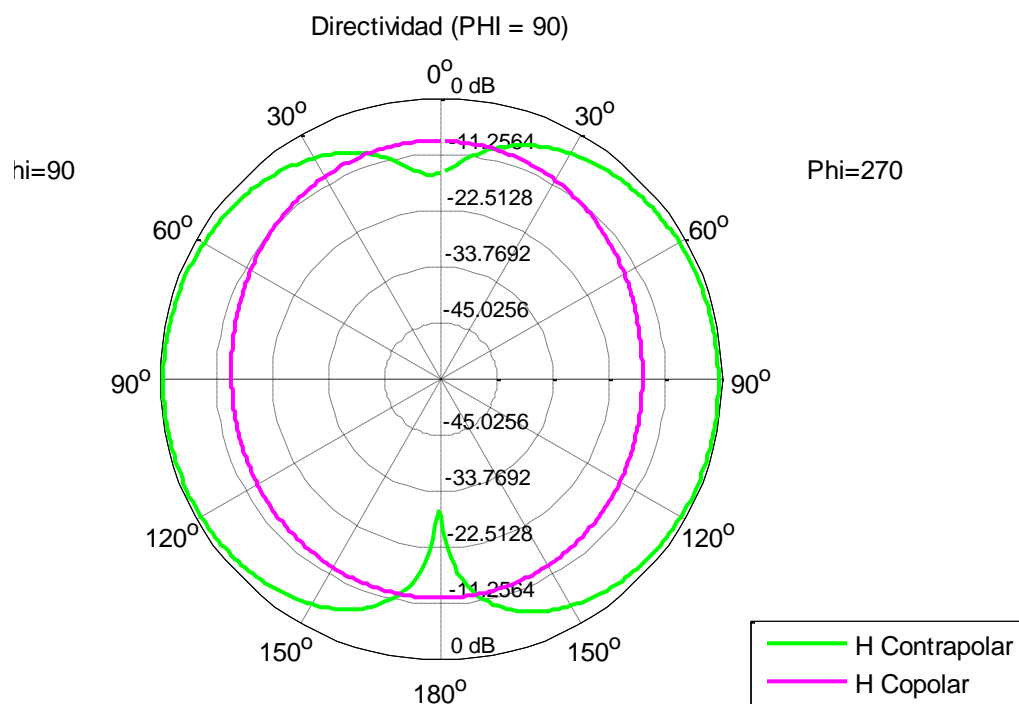


Ilustración 101. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.15GHz plano H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Por último vemos representados los diagramas de campo eléctrico y distribución de corrientes observando que se comportan como un modo de radiación monopolar tal y como se ha comprobado al ver la representación del diagrama de radiación.

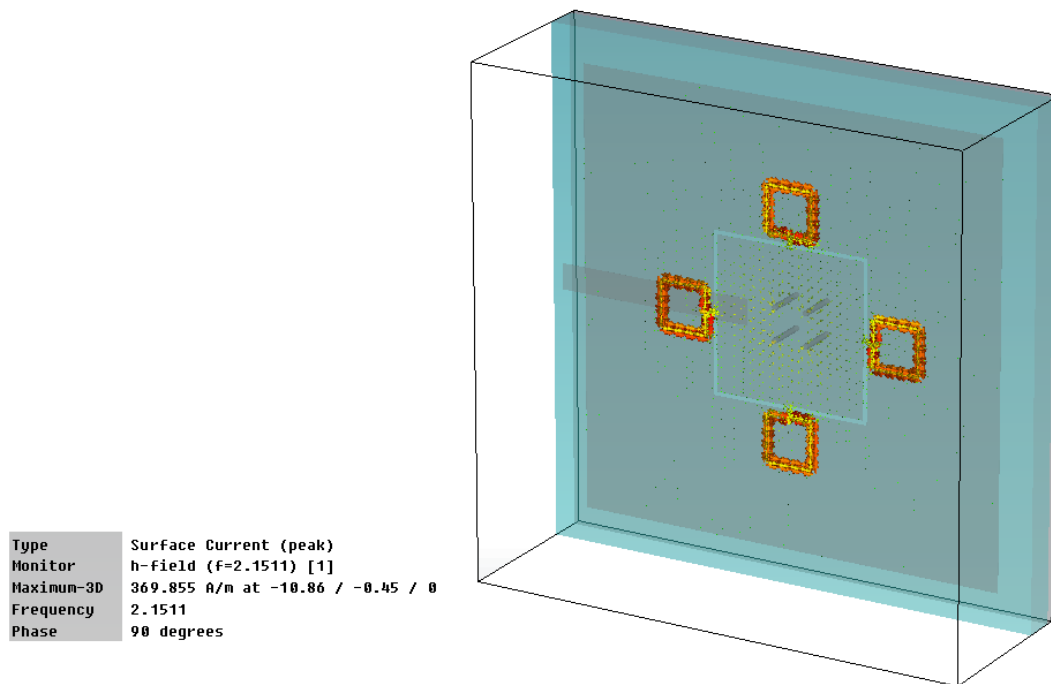


Ilustración 102. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.15GHz

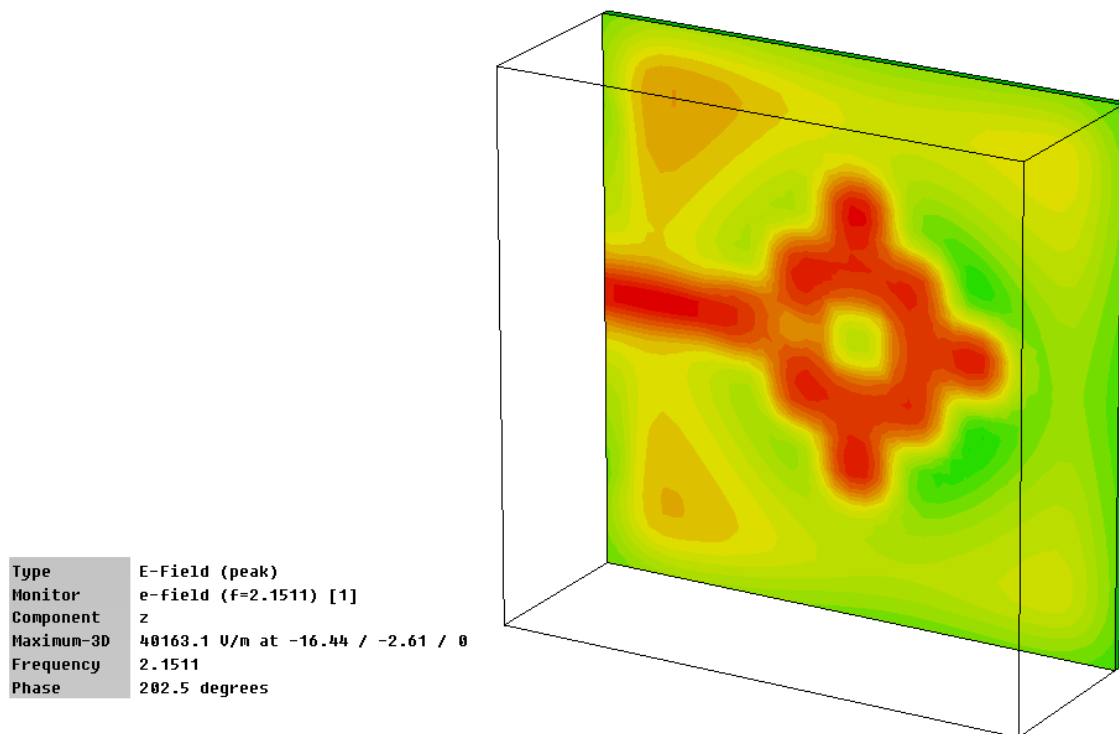


Ilustración 103. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.15GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Para la frecuencia de resonancia de los OCSRRs representamos el diagrama de radiación en 3D comprobando que al igual que antes volvemos a obtener un diagrama de radiación broadside. Vemos como se alcanza una directividad de 7.51dB y una ganancia 6.96dB.

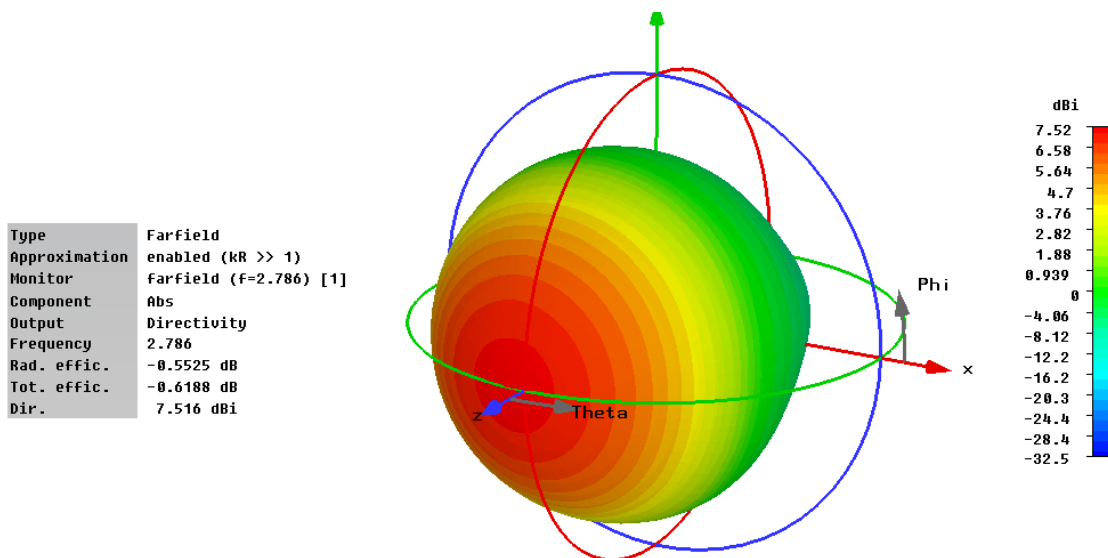


Ilustración 104. Diagrama de Radiación para la frecuencia 2.79GHz

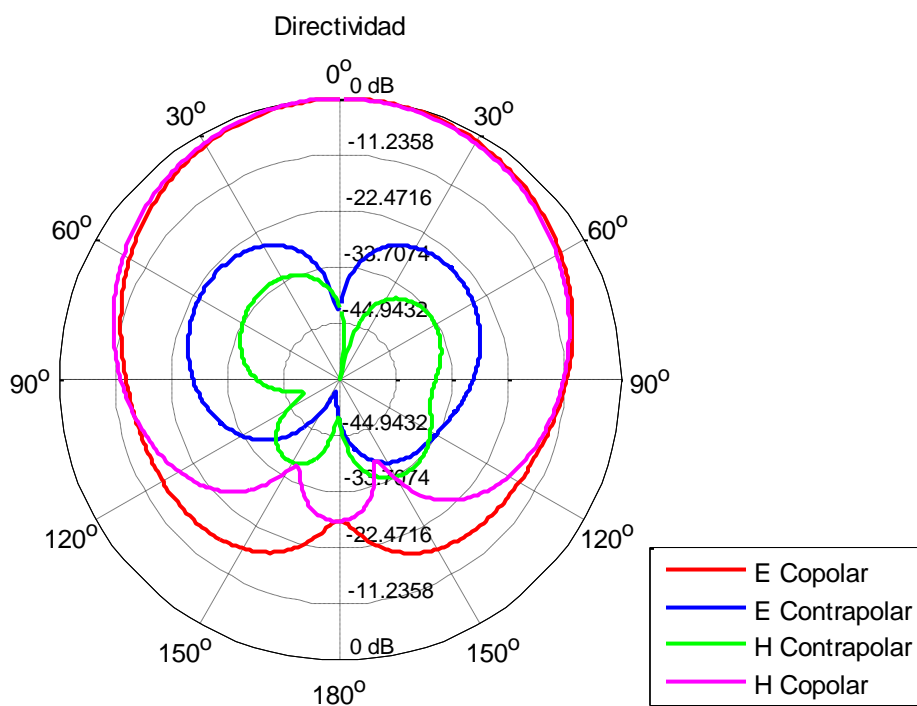


Ilustración 105. Diagrama de Radiación en polares planos E y H para la frecuencia 2.79GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSR

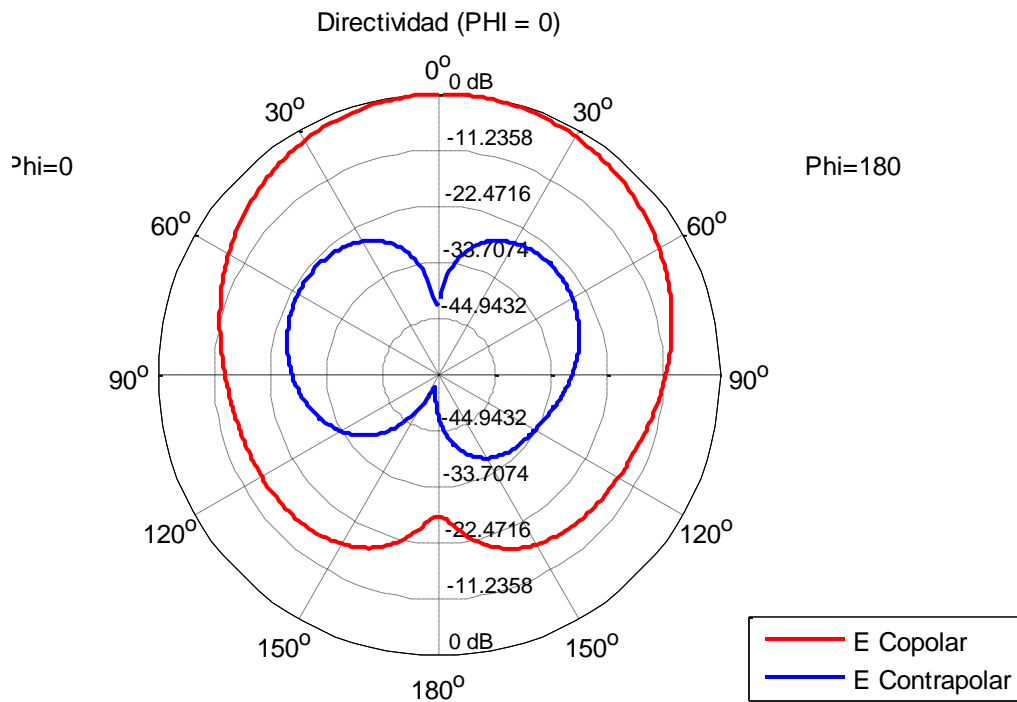


Ilustración 106. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.79GHz plano E

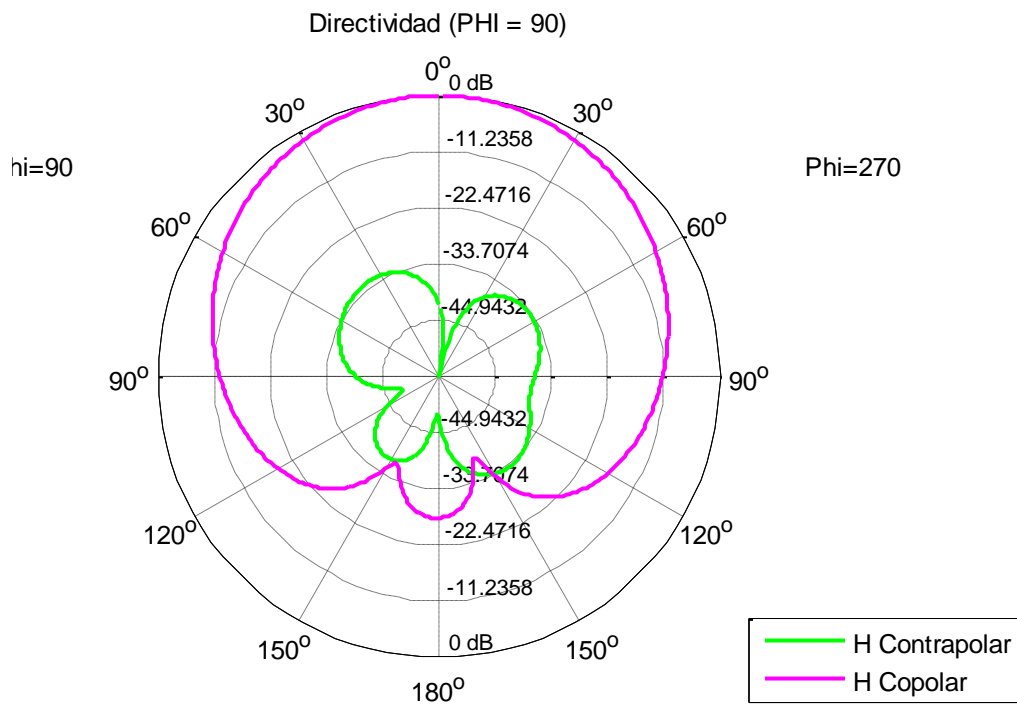


Ilustración 107. Diagrama de radiación en polares para la frecuencia de 2.79GHz plano H

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Por último vemos representados los diagramas de campo eléctrico y distribución de corrientes observando que se comportan como un modo de radiación de tipo parche (media longitud de onda) tal y como se ha visto en la representación del diagrama de radiación.

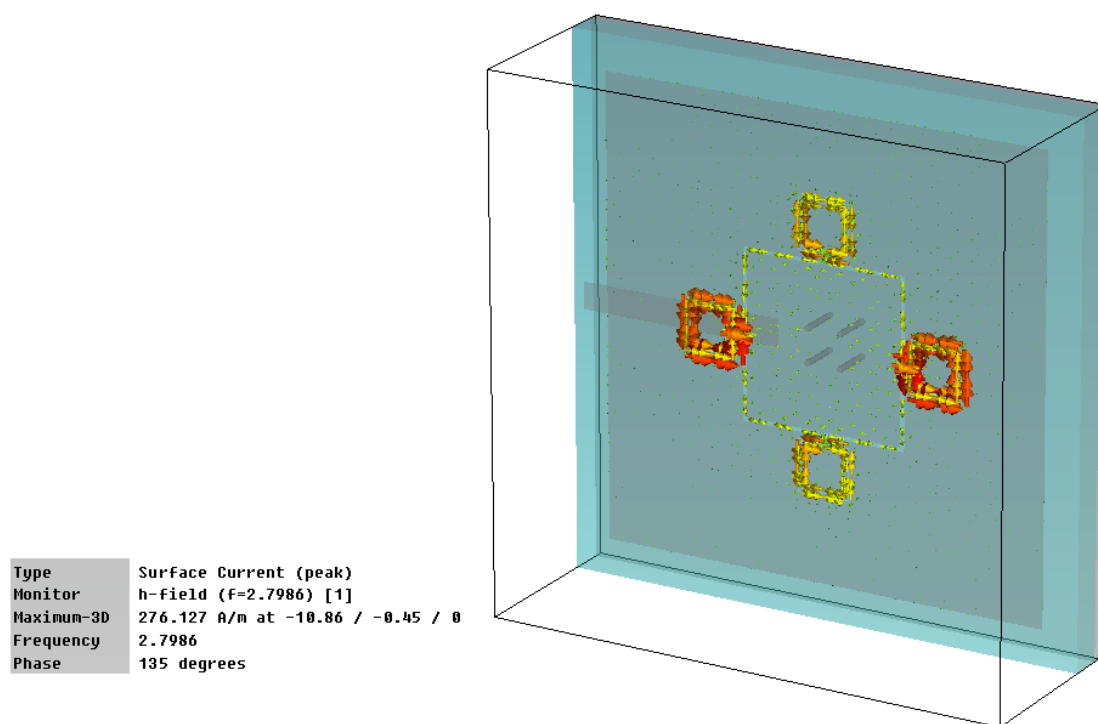


Ilustración 108. Distribución de corrientes para la frecuencia 2.79GHz

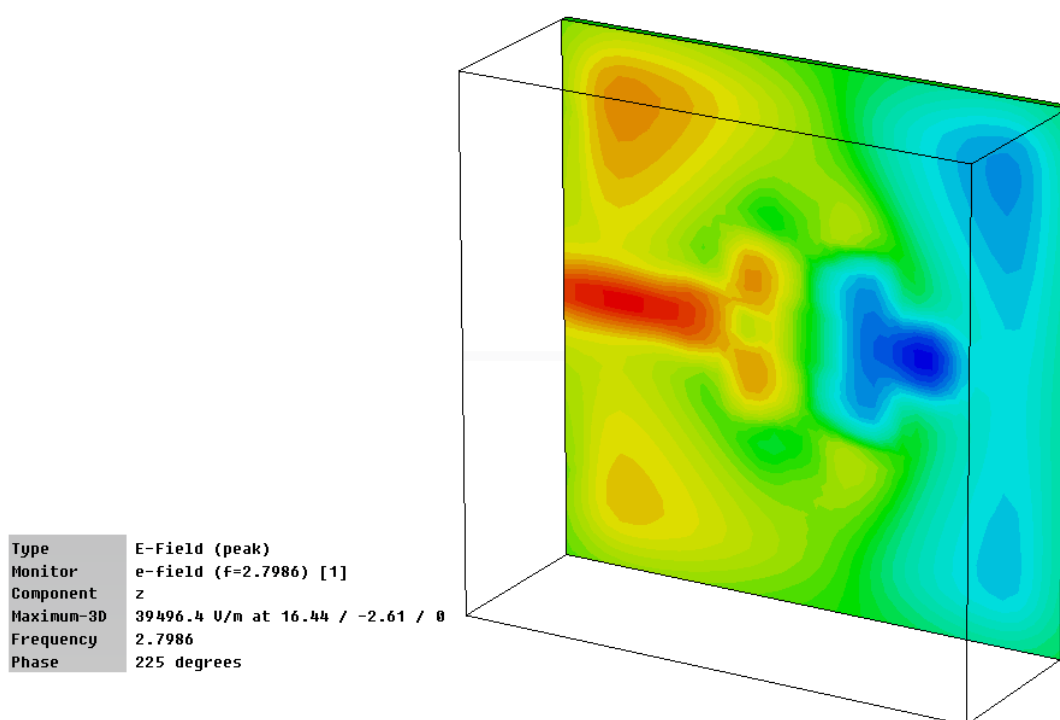


Ilustración 109. Distribución campo Eléctrico frecuencia 2.79GHz

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

-Comparativa entre el parche cargado con OCSRRs, convencional, cortocircuitado cargado con OCSRRs y con un parche en anillo

A continuación se muestra una comparativa con el parche convencional, con un parche en anillo convencional y con la estructura diseñada en el apartado anterior sin tener el corto con la diferencia que todas están alimentadas con la alimentación en línea para que la comparación sea más realista:

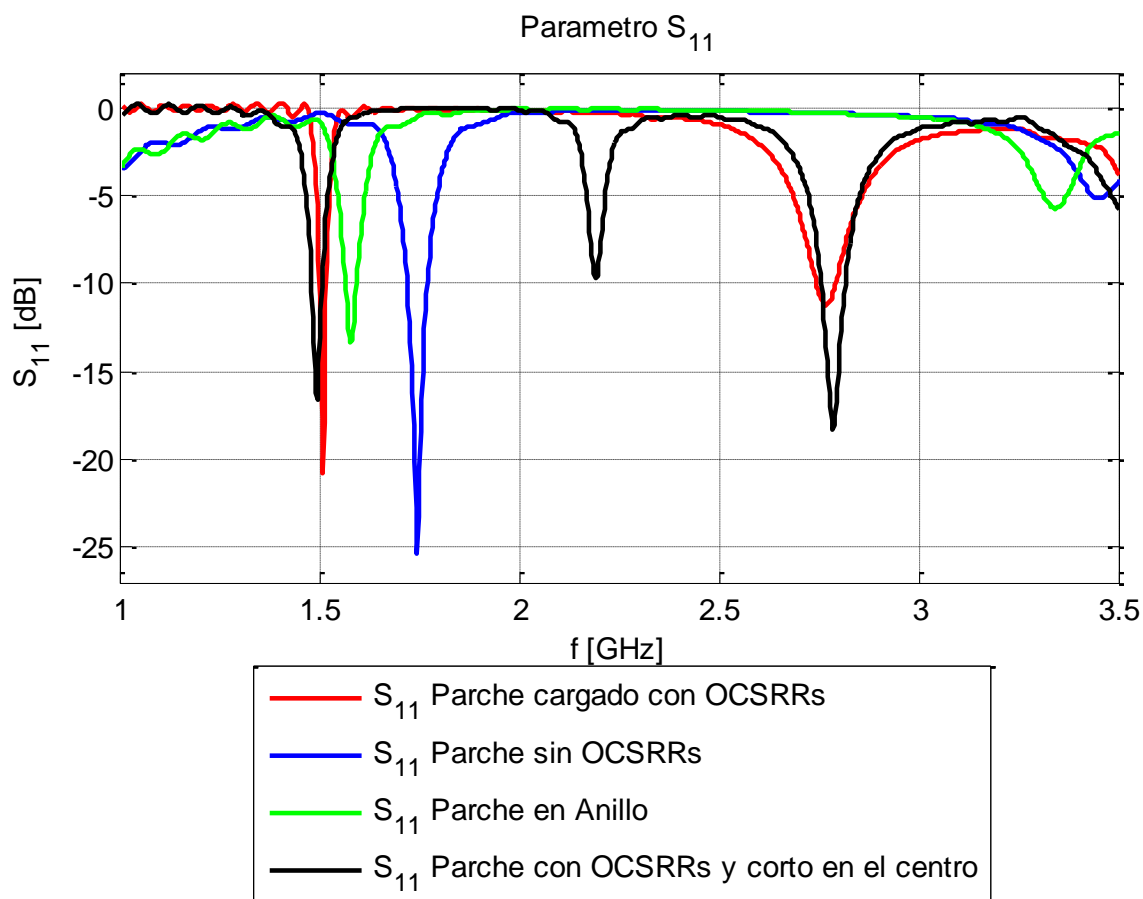


Ilustración 110. Comparativa entre el parche convencional, cargado con OCSRRs, cortocircuitado cargado con OCSRRs y con un parche en anillo

Tabla 11. Tabla comparativa del parche convencional, el parche cargado con OCSRRs y el parche cortocircuitado cargado con OCSRRs

	Frecuencia de Funcionamiento	Ancho de Banda	Diagrama de Radiación
Parche convencional	1.72GHz	6.9%	Tipo Parche
Parche cargado con 4 OCSRRs	1.5GHz	2.54%	Tipo Parche
	2.77GHz	6.09%	Tipo Parche

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Parche con cortocircuito	1.49GHz	3.38%	Tipo Parche
	2.19GHz	1.97%	Tipo Monopolar
	2.78GHz	3.94%	Tipo Parche

En los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones podemos observar que en la antena de parche convencional (sin estar cargada con los OCSRRs) sólo hay una banda de frecuencia en la región de interés centrada en 1.72 GHz. Las frecuencias que se abarcan van de 1.61GHz a 1.78GHz (considerados desde $|S_{11}| < -6\text{dB}$) consiguiendo un ancho de banda relativo de 6.9%.

En la antena de parche cargada con los OCSRRs hay dos bandas de interés, la primera abarca de 1.47GHz a 1.5GHz, considerados también desde $s_{11} < -6\text{dB}$, lo que supone un 2.54% de ancho de banda relativo centrado en 1.5GHz. Del mismo modo la segunda frecuencia abarca desde 2.69GHz a 2.86GHz y está centrada en 2.77GHz dando lugar a un 6.09% de ancho de banda relativo. La frecuencia de la primera resonancia es la producida por el parche y está por debajo de la frecuencia de resonancia del parche convencional debido al comportamiento inductivo de los OCSRRs bajo esta frecuencia. La segunda resonancia aparece a la frecuencia de resonancia de los OCSRRs. Para el caso del parche con el cortocircuito en el centro tenemos un ancho de banda de la frecuencia inferior que va desde 1.46GHz a 1.51GHz centrado en 1.49GHz obteniendo un ancho de banda 3.38%, para la frecuencia intermedia presenta un ancho de banda desde 2.16GHz a 2.21GHz obteniendo 1.97% centrado en 2.19GHz y por último para la frecuencia superior obtenemos un ancho de banda 3.94% que va desde 2.73GHz a 2.84GHz centrados en 2.78GHz. Después tenemos el parche en anillo donde vemos que la frecuencia inferior de funcionamiento se desplaza ligeramente hacia un valor de frecuencia más elevado, pero vemos que no nos introduce ninguna nueva frecuencia, este caso se representó para comprobar que funcionaba correctamente y no aparecía ninguna otra frecuencia que afectase a la simulación.

También podemos ver que están bien adaptados en todos los casos, siendo la frecuencia peor adaptada la correspondiente al cortocircuito.

En cuanto al modo de funcionamiento observamos viendo los diagramas de radiación y distribución de campo eléctrico y corrientes obtenidos de las simulaciones de los parches, que en todos los casos el parche tiene diagrama de radiación broadside excepto en la frecuencia producida por el cortocircuito donde podemos ver un diagrama de radiación de tipo monopolar.

En vista de los datos obtenidos, podemos concluir que el parche mantiene el mismo comportamiento en todos los casos salvo en la frecuencia del cortocircuito donde obtenemos un diagrama de radiación de tipo monopolar. En cuanto al ancho de banda relativo vemos cómo se ve reducido considerablemente pasando de 6.9% a un 2.54% y 3.38%, mejorando este del primer modelo al segundo para la frecuencia fundamental del parche. En cambio vemos que a la frecuencia de los OCSRRs se reduce de un 6.09% a 3.94%.

4.3 Estudio paramétrico

A continuación se va a realizar el estudio paramétrico de la antena de parche cortocircuitado cargada con cuatro OCSRRs.

En primer lugar, se mantienen todos los parámetros fijos menos la longitud del parche externo.

Si modificamos la longitud del parche externo modificaremos su frecuencia de funcionamiento consiguiendo una frecuencia más elevada para una longitud más pequeña y de igual forma conseguimos una menor frecuencia de funcionamiento para una longitud mayor del lado del parche.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Este hecho puede observarse en la ilustración 111, viendose que en nuestro modelo obtenido al variar este parámetro también se mueve de forma proporcional la frecuencia de los OCSRRs. Observamos además que para la frecuencia del parche la adaptación se mantiene igual, empeorando en la frecuencia de los OCSRRs a medida que se hace más pequeña la longitud del parche externo.

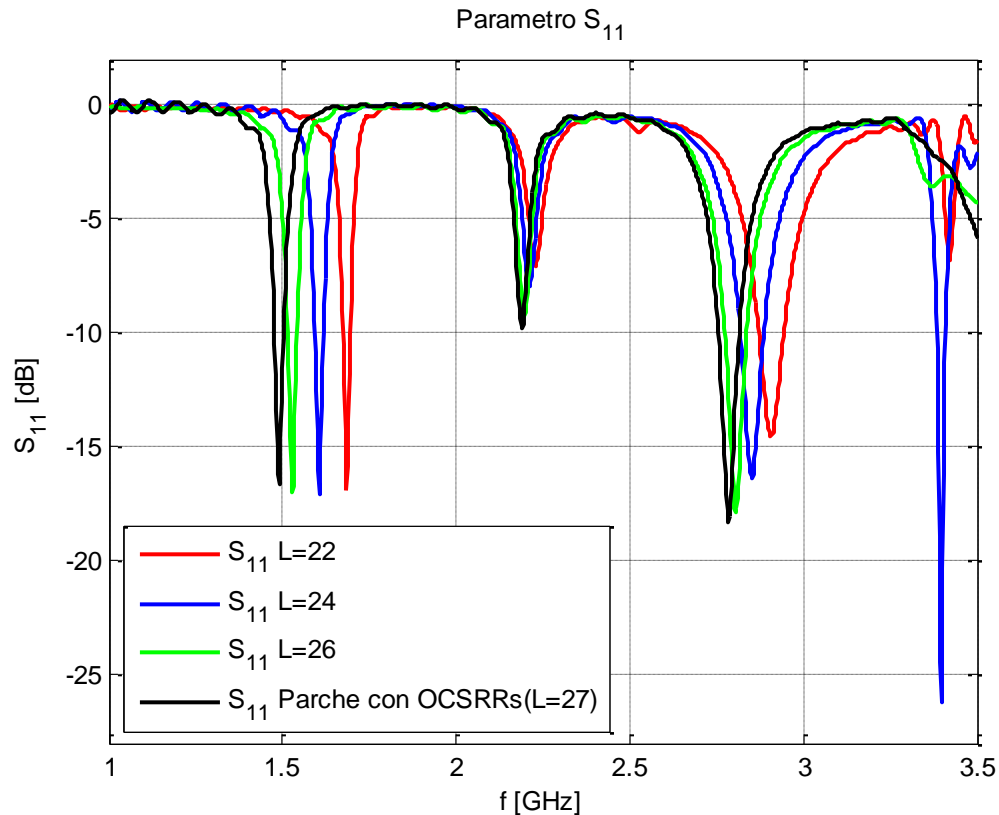


Ilustración 111. Variación del parámetro $|S_{11}|$ moviendo la longitud del parche externo

En el siguiente estudio vemos que si modificamos la longitud externa de las partículas OCSRRs pasa lo mismo, consiguiendo que funcionen a una frecuencia más elevada para una longitud menor y funcionando a una frecuencia menor para una mayor longitud.

En la siguiente gráfica podemos comprobar que al variar la longitud de los OCSRRs también nos afecta a la frecuencia del cortocircuito viendo que se mueve de manera aproximadamente proporcional.

Podemos ver como se mantiene prácticamente fija la frecuencia del parche variando levemente su posición y su adaptación. En cambio vemos como la adaptación para las otras dos frecuencias aumenta a medida que reducimos la longitud de las partículas resonantes.

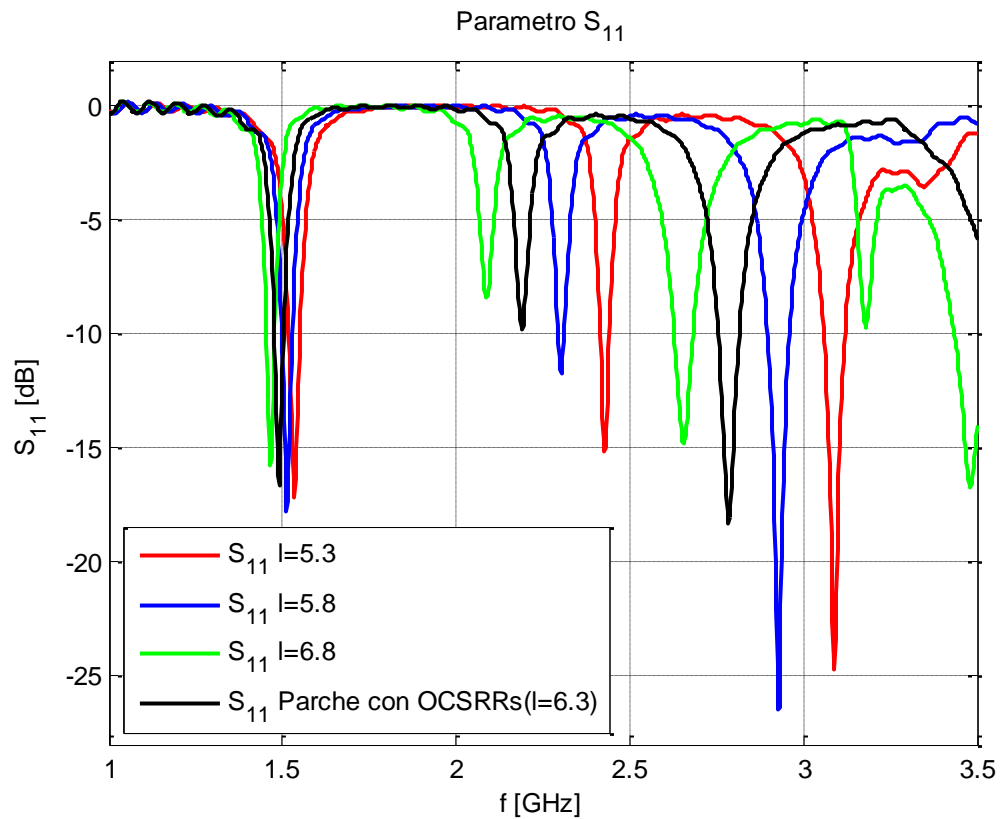


Ilustración 112. Variación del parámetro $|S_{11}|$ moviendo la longitud de los OCSRRs

Por último en este estudio paramétrico se dejan fijos todos los parámetros excepto el radio del cortocircuito circular situado en el centro del parche. Podemos comprobar en la siguiente gráfica cómo la frecuencia fundamental del parche no sufre ninguna variación y la correspondiente a los OCSRRs se mueve levemente, así como su adaptación que también varía de forma poco significativa. En cambio como cabía esperar la frecuencia correspondiente al cortocircuito varía a medida que cambia el radio del cortocircuito, obteniendo una frecuencia de funcionamiento mayor y mejor adaptada para un radio mayor.

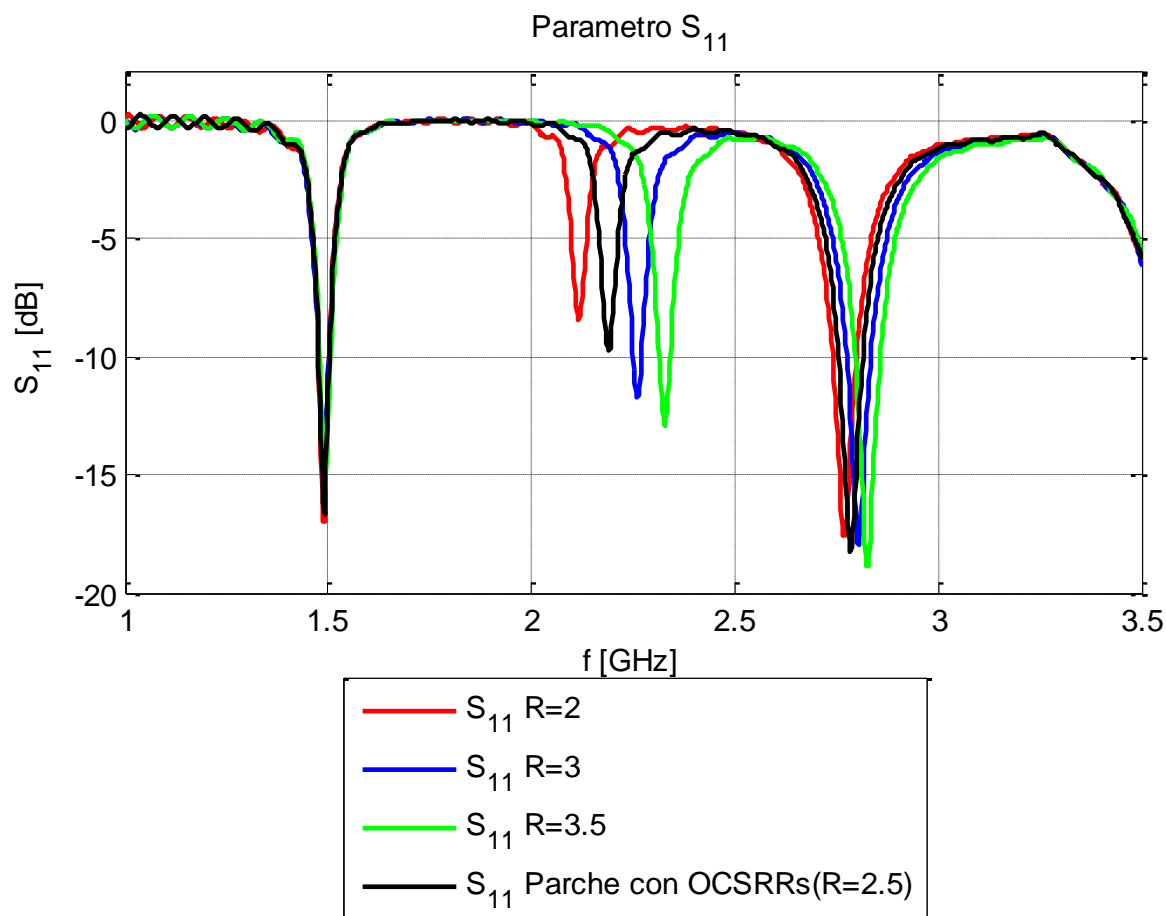


Ilustración 113. Variación del parámetro $|S_{11}|$ moviendo el radio del cortocircuito

Al igual que ocurría en el estudio paramétrico de la antena diseñada en el apartado anterior se va a comentar también el efecto que produciría en nuestras frecuencias si cambiásemos otros valores de las dimensiones del parche:

1. Si modificamos el ancho del sustrato veremos modificaciones tanto en la adaptación de las frecuencias como en el valor de la frecuencia de funcionamiento que se podrá desplazar levemente. Cuanto más ancho es el sustrato las frecuencias se desplazan hacia la parte inferior del espectro, del mismo modo cuanto más estrecho el desplazamiento es a frecuencias superiores.
2. Si modificamos el punto de alimentación del parche se observan variaciones en la adaptación de las frecuencias pudiendo además verse desplazado levemente el valor de la frecuencia de funcionamiento.
3. Si modificamos la longitud del parche interno a los OCSRRs podemos observar que al aumentar su tamaño la frecuencia de funcionamiento de los OCSRRs es más alta mientras que al reducir su tamaño se reduce el valor de dicha frecuencia de funcionamiento.

4.4 Resultados Experimentales

La antena tipo parche analizada en el paso anterior, fue construida como puede verse en la siguiente imagen:

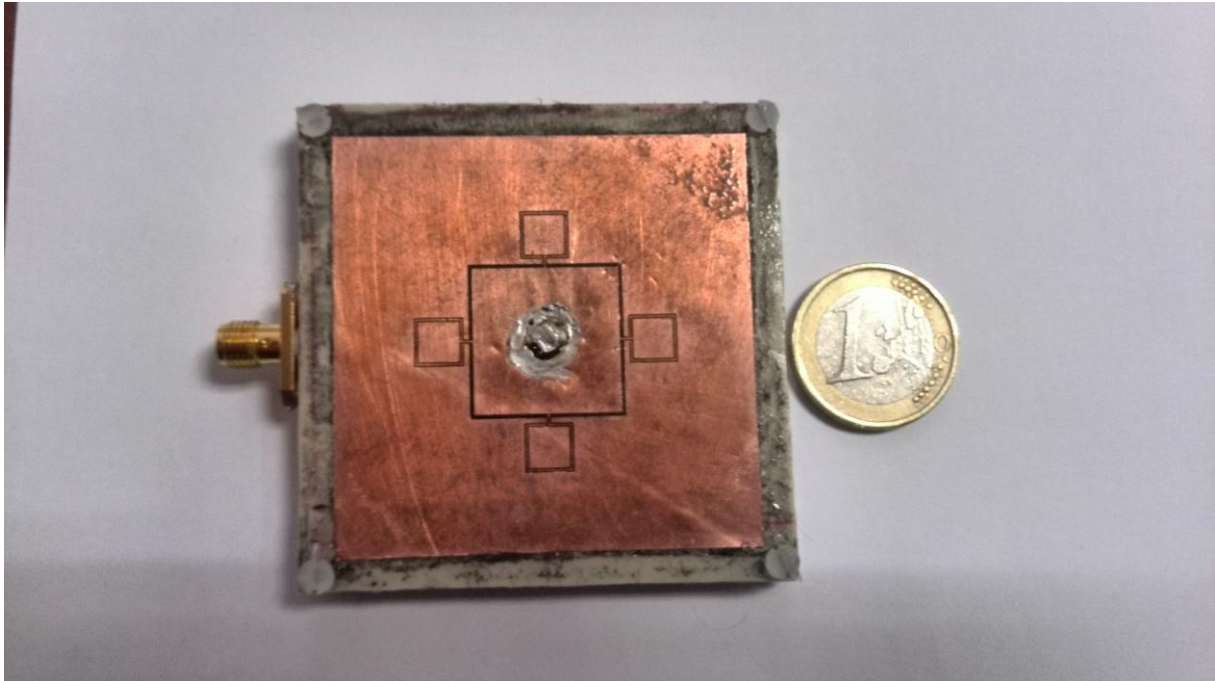


Ilustración 114. Prototipo de la antena de parche cortocircuitada cargada con cuatro OCSRRs

A continuación se muestra de nuevo el parámetro $|S_{11}|$ obtenido con CST junto con la representación de los resultados experimentales obtenidos:

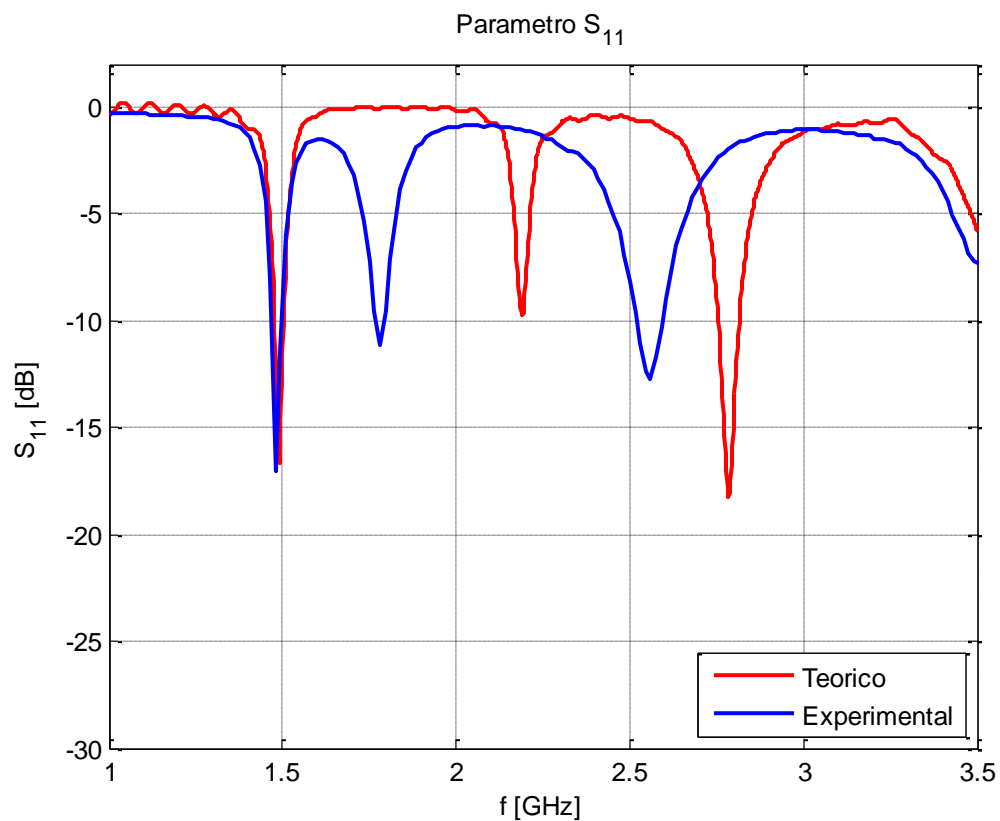


Ilustración 115. Resultados experimentales del parámetro $|S_{11}|$ para el parche cargado con 4OCSRRs

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

Tabla 12. Tabla comparativa de los resultados experimentales y teóricos del parche

	Frecuencia de Funcionamiento	Ancho de Banda	Diagrama de radiación
Experimentales	1.48GHz	3.23%	Tipo parche
	1.78GHz	5.06%	Tipo monopolar
	2.56GHz	3.66%	Tipo parche
Teóricos	1.49GHz	3.38%	Tipo parche
	2.19GHz	1.97%	Tipo monopolar
	2.78GHz	3.94%	Tipo parche

Podemos ver, comparando los resultados obtenidos con el CST con los experimentales, que las frecuencias sufren un ligero desplazamiento hacia la izquierda siendo más pronunciado para la frecuencia del cortocircuito. Vemos como la frecuencia inferior pasa de 1.49GHz a 1.48GHz, la frecuencia intermedia pasa de 2.17GHz a 1.78GHz y la superior de 2.82GHz a 2.56GHz. Esta variación puede deberse a la tolerancia de la permitividad tal y como se comentó para el caso anterior, dado que el sustrato empleado en la construcción de la antena ha sido polipropileno cuya permitividad no conocemos de forma exacta ya la que empleamos en las simulaciones es un valor orientativo pero no el exacto del material en cuestión, además también puede ser debido a que al utilizar una alimentación por acoplo para la antena, el sustrato no estaba perfectamente solapado lo que pudo producir variaciones más pronunciadas.

Para el cálculo de los anchos de banda relativos para los resultados experimentales podemos ver que hay tres bandas de interés, la primera abarca de 1.46GHz a 1.51GHz, considerados también desde $|S_{11}| < -6\text{dB}$, lo que supone un 3.23% de ancho de banda relativo centrado en 1.48GHz. Del mismo modo la segunda frecuencia abarca desde 1.73GHz a 1.82GHz y está centrada en 1.78GHz dando lugar a un 5.06% de ancho de banda relativo. Por último la tercera frecuencia abarca de 2.46GHz a 2.65GHz centrada en 2.56GHz obteniendo así un ancho de banda de 3.66%. Podemos ver como el ancho de banda ha mejorado con respecto a lo que habíamos obtenido de forma teórica para la frecuencia de funcionamiento del cortocircuito, pasando de 1.97% a un 5.06%. En cambio para las otras dos frecuencias ha empeorado levemente pasando de 3.38% a 3.23% para la primera frecuencia y de 3.94% a 3.66% para la correspondiente a los OCSRRs.

En este caso podemos ver que ha empeorado considerablemente la adaptación, pasando en la frecuencia fundamental de -22.4dB a -17.04dB, en la correspondiente al cortocircuito de -25.44dB a un valor de -11.1dB y en la de funcionamiento de los OCSRRs de -28.08dB a -12.72dB. A pesar de este hecho podemos ver que las tres frecuencias se encuentran adaptadas.

También se comprueba que los diagramas de radiación obtenidos de forma experimental se corresponden con los mismos obtenidos en simulación, aunque este hecho se verá de forma más clara al observar las siguientes gráficas.

A continuación se van a mostrar los diagramas de radiación obtenidos de forma experimental en dos dimensiones:

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSR

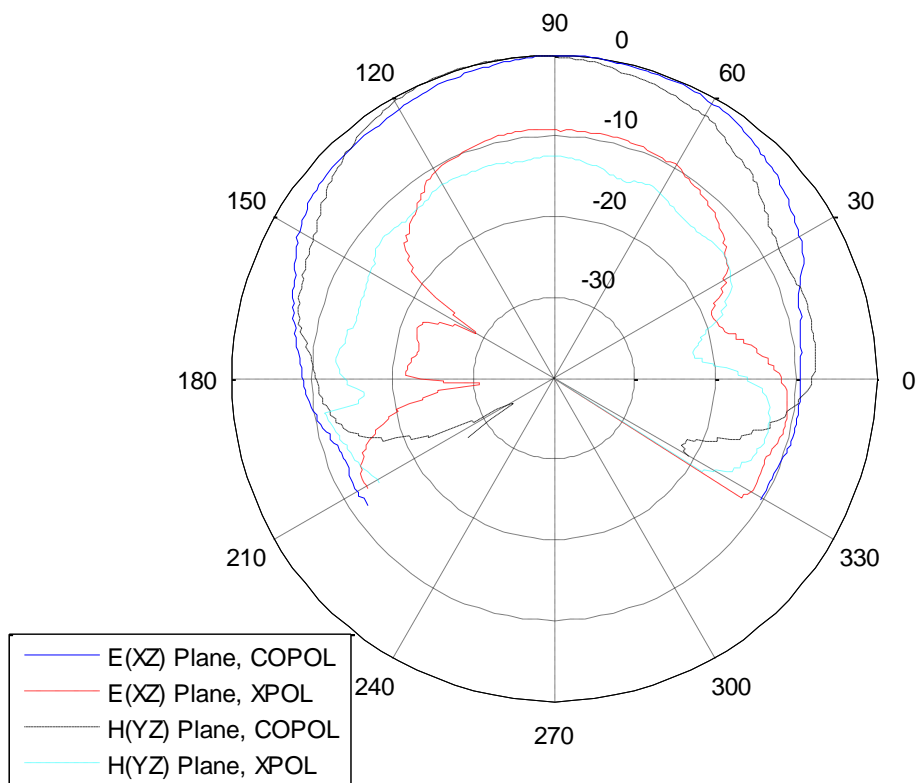


Ilustración 116. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenido de forma experimental a frecuencia de 1.48GHz

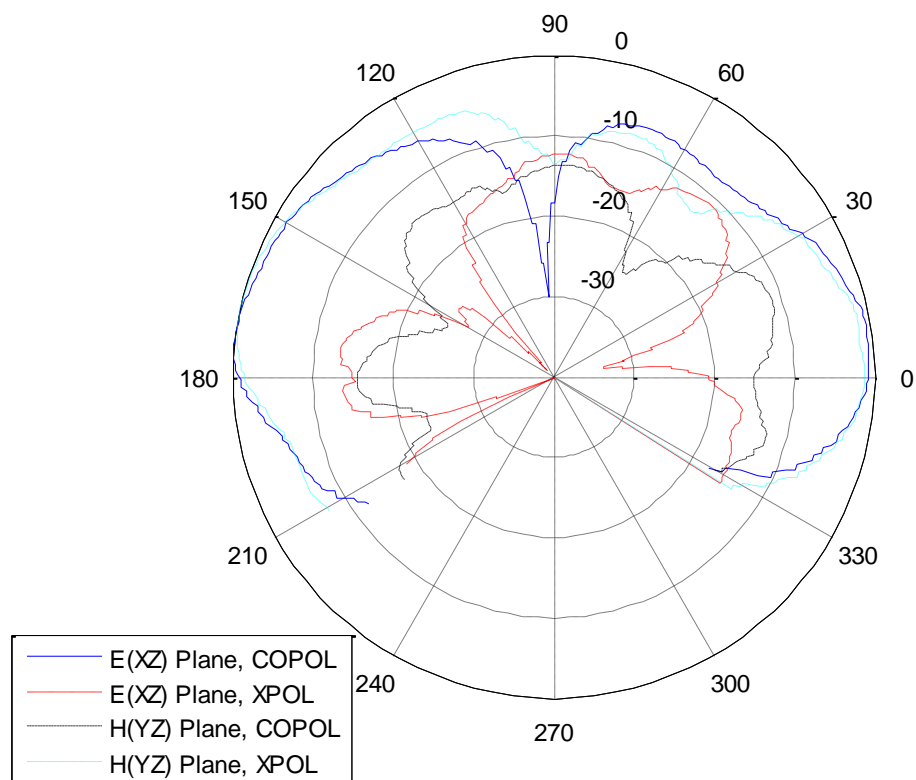


Ilustración 117. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenido de forma experimental a frecuencia de 1.78GHz

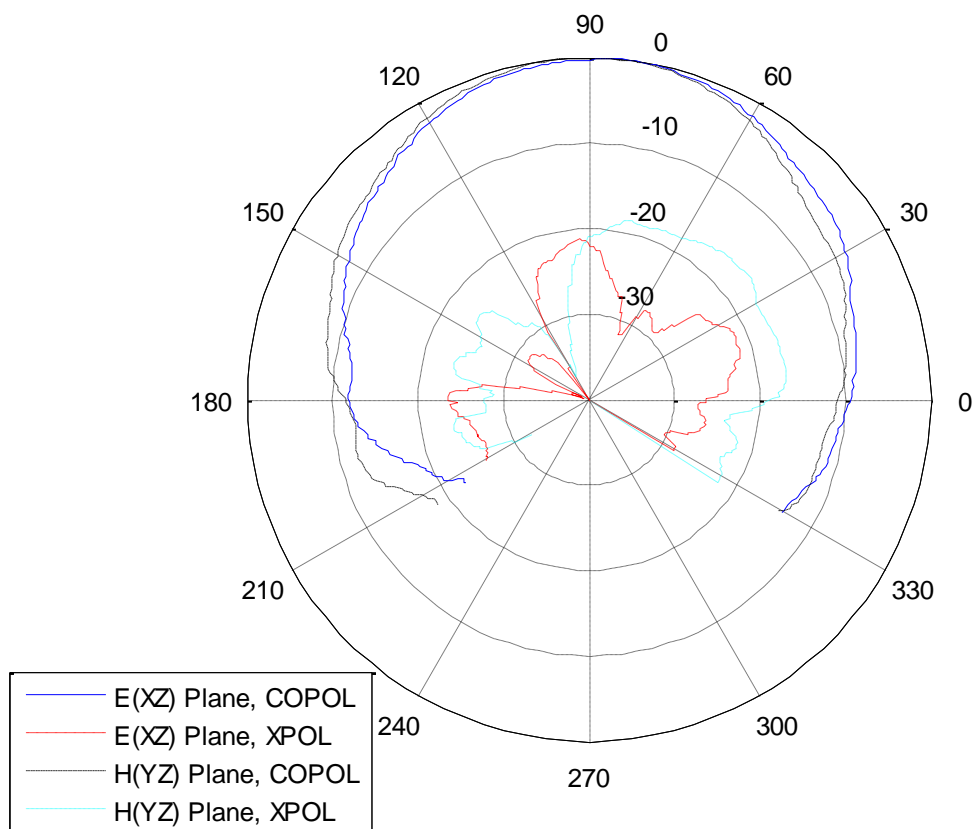


Ilustración 118. Diagrama de radiación en polares planos E y H obtenidos de forma experimental a frecuencia de 2.56GHz

Al observar los diagramas de radiación obtenidos comprobamos que el parche está radiando con diagramas similares a los obtenidos en la simulación. Podemos ver que para la frecuencia inferior obtenemos un valor de componente contrapolar máximo -9dB en el plano H por lo que el resto de valores se encuentran por debajo de este valor, y en el punto de máxima radiación contamos con un valor de componente contrapolar de -9dB en el plano H observando una componente contrapolar un poco elevada.

Para la segunda frecuencia observamos un valor máximo de componente contrapolar de -13dB en el plano H coincidiendo con el valor que toma también el valor máximo de la componente contrapolar del plano E, tomando este valor máximo en el punto de máxima radiación.

Para la tercera frecuencia observamos un valor máximo de componente contrapolar de -18dB y en el punto de máxima radiación y -22dB en el plano E siendo un valor aceptable.

5 CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto era diseñar dos antenas de parche multifrecuencia para frecuencias arbitrarias próximas, empleando para ello partículas resonantes OCSRR obteniendo diagramas de radiación broadside en dichas frecuencias de funcionamiento.

Para ello, inicialmente, se han diseñado por separado el parche cuadrado y los OCSRRs a integrar. Una vez obtenido el parche se añadieron las partículas resonantes y se realizaron las simulaciones. Los primeros resultados obtenidos no fueron los deseados, pero finalmente después de optimizar, se llegó a dos modelos que funcionaron como se deseaba para doble y triple frecuencia tanto de forma teórica como experimental.

Como parte del trabajo efectuado, se han fabricado dos prototipos para los que se han obtenido los siguientes resultados experimentales:

- Antena de parche de doble banda:
 - Frecuencia de resonancia en 1.48GHz con un ancho de banda del 2.76% y un diagrama de radiación de tipo parche.
 - Frecuencia de resonancia en 2.56GHz con un ancho de banda del 8.4% y un diagrama de radiación de tipo parche.
- Antena de parche de triple banda:
 - Frecuencia de resonancia en 1.48GHz con un ancho de banda del 3.23% y un diagrama de radiación de tipo parche.
 - Frecuencia de resonancia en 1.78GHz con un ancho de banda del 5.06% y un diagrama de radiación de tipo monopolar.
 - Frecuencia de resonancia en 2.56GHz con un ancho de banda del 3.66% y un diagrama de radiación de tipo parche.

En el caso de la segunda antena, cabe destacar que en una de sus bandas de funcionamiento se ha obtenido un diagrama de radiación de tipo monopolar, a diferencia del diagrama de radiación de tipo parche de las otras dos bandas lo que puede resultar de utilidad por ejemplo para los puntos de acceso de los sistemas de comunicaciones.

En vista de los resultados obtenidos se puede concluir que se han conseguido dos prototipos que funcionan en multifrecuencia para una antena planar y monocapa. Como novedad se puede destacar, que las partículas resonantes empleadas no habían sido integradas en antenas de parche hasta el momento, y aportan ventajas con respecto a otros resonadores planares dado que son eléctricamente más pequeñas y consiguen mejor ancho de banda para su frecuencia de resonancia que los SRR y CSRR que se habían empleado en estudios anteriores.

Por último, cabe destacar que el parche de doble frecuencia detallado en el capítulo 3 de este proyecto fue llevado a un congreso de la URSI en Santiago de Compostela el año 2013, donde se presentó y defendió.

La referencia de la contribución presentada en el congreso nacional de la URSI es la siguiente:

F. J. Herraiz Martínez, I. Cuadrado Gutiérrez, y D. Segovia Vargas, "Parche de doble frecuencia cargado con resonadores OCSRR", XXVIII Simposium Nacional de la URSI, Santiago de Compostela, Septiembre 2013.

6 LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se va a explicar el tipo de pruebas que pueden realizarse en un futuro para mejorar los diseños obtenidos en este proyecto o adaptarlos a alguna nueva frecuencia para algún tipo de servicio determinado.

1. En primer lugar podría realizarse un nuevo dimensionamiento de la antena haciendo que funcione a otras frecuencias que pueden ser de más interés como podría ser la de WiFi (2.45GHz, 5.15GHz). Para conseguir que el parche funcione a estas frecuencias habría que modificar los distintos parámetros que tienen libertad en nuestro diseño tal y como se ha visto en el estudio paramétrico. Por lo que trasladando ciertas medidas y viendo como afectan en el diseño se puede transportar el modelo a uno nuevo que funcione a las frecuencias próximas deseadas.
2. Una segunda mejora que puede realizarse, sería poner dos OCSRRs en cada lado para aumentar el ancho de banda. Es decir, en vez de tener un único OCSRR como se tiene ahora mismo en ambos modelos, poner muy cerca dos OCSRRs en cada lado del parche para comprobar si este hecho hace que aumente el ancho de banda relativo. Los OCSRRs deberían tener las mismas dimensiones que los diseñados en este proyecto, y deberían colocarse de manera que formen una estructura simétrica. La estructura quedaría igual que la de los prototipos diseñados pero con ocho OCSRRs en total, habiendo dos a cada lado.
3. Por último, un futuro diseño que se podría realizar sería buscar un parche que funcione a cuatro frecuencias: dos con diagrama de radiación de tipo parche y dos con diagrama de radiación de tipo monopolar. Para conseguir este hecho, añadiríamos a la antena de parche que funciona a triple frecuencia cuatro hilos metálicos, uno en cada esquina del parche a modo de cortocircuitos. El radio de los cilindros tendrá que ajustarse de forma que no estropeen la adaptación de las otras tres frecuencias de funcionamiento obtenidas.

7 PRESUPUESTO

Para la realización del presente proyecto, ha habido varias fases de desarrollo. En primer lugar se hizo un estudio sobre los metamateriales desde su definición hasta los resultados obtenidos al emplear este tipo de estructuras en antenas. También se estudiaron las antenas de parche ya que son las estructuras que se iban a emplear para los modelos obtenidos.

Una vez realizado este estudio se procedió al diseño y simulación del software de la primera antena. Al no obtener los resultados esperados se optó por cambiar el diseño volviendo a diseñar un nuevo modelo y simulación del mismo.

Nuevamente los resultados no fueron los esperados por lo que se cambiaron las dimensiones del modelo anterior realizándose de nuevo los cambios pertinentes y las nuevas simulaciones.

Este último modelo diseñado ya funcionaba correctamente según nuestros objetivos por lo que se diseñó dicho prototipo y se realizaron las medidas experimentales en el laboratorio.

Para este modelo se introdujo un corto circuito para obtener un funcionamiento del mismo en triple frecuencia, y una vez se hicieron diferentes pruebas y se obtuvo el diseño final en simulación, se construyó también y se realizaron las medidas de manera experimental.

Una vez terminadas las fases de desarrollo del proyecto y solapándose con algunas de ellas, se realizó la redacción de la memoria.

Todas estas fases se muestran con sus fechas correspondientes de realización en el diagrama de Gantt que puede verse a continuación.

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

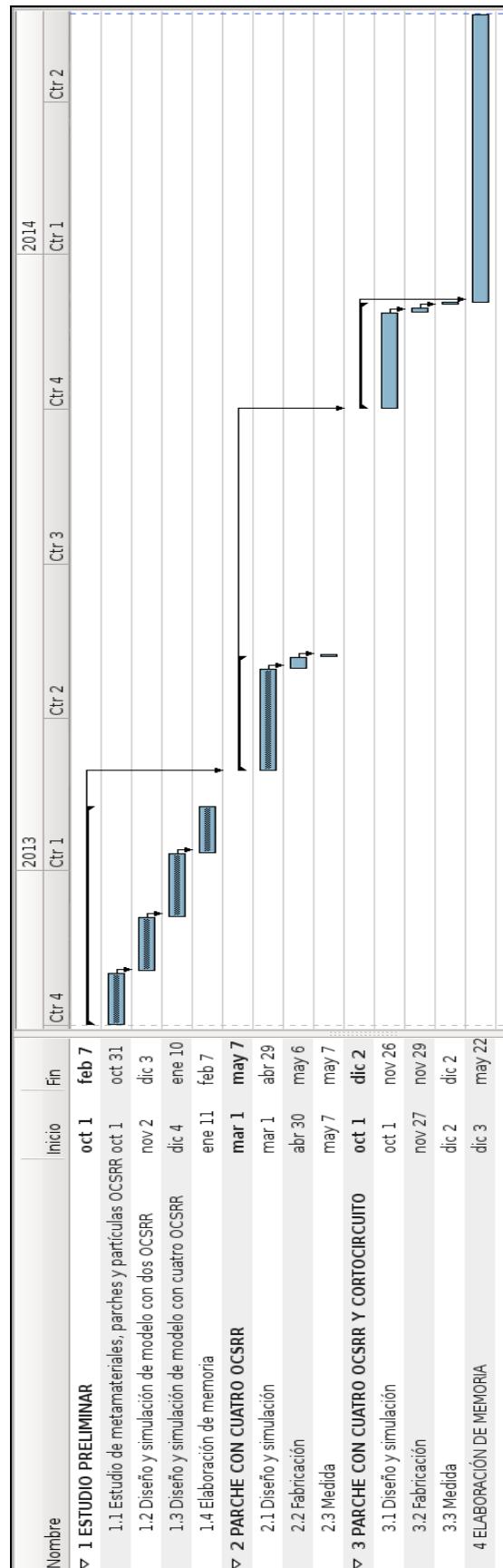


Ilustración 119. Diagrama de Gantt del proyecto



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Isabel Cuadrado Gutiérrez

2.- Departamento: Teoría de la señal y las comunicaciones

3.- Descripción del Proyecto:

- Título: Antenas de Parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRRs

- Duración (meses): 17 meses

Tasa de costes Indirectos: 20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros): 28571 Euros

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformi dad
Cuadrado Gutiérrez, Isabel		Ingeniero	6.782	2.694,39	18273.35	
Herraiz Martínez, Javier		Ingeniero Senior	0.856	4.289,54	3671.85	
Técnico de Laboratorio		Técnico	0.175	2.694,39	471.52	
Hombres mes			7.813	Total	22416.72	

^{a)} 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)

Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

Antenas de parche multifrecuencia cargadas con resonadores OCSRR

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
Ordenador	800	100	17	60	226.67
Programas de Simulación	3000	100	17	60	850
Analizador de resdes	100000	100	0.1	60	166.67
Total					1243.37

^{d)} Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Total		0,00

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO^{e)}

Descripción	Empresa	Costes imputable
Costes Prototipos	Universidad Carlos III de Madrid	150
Total		150

^{e)} Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	22416
Amortización	1243
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	150
Costes Indirectos	4762
Total	28571

“El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de VEINTIOCHO MIL QUINIENTOS SETENTA Y UN EUROS.

Leganés a 20 de Mayo de 2014

El ingeniero proyectista

Fdo. Isabel Cuadrado Gutiérrez”

8 REFERENCIAS

- [1] A. Lai, T. Itoh, and C. Caloz, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials", IEEE Microwave Magazine, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, Sep. 2004.
- [2] F. J. Herraiz-Martínez, G. Zamora, F. Paredes, F. Martín, and J. Bonache, "Multiband Printed Monopole Antennas loaded with Open Complementary Split Ring Resonators (OCSRRs) for PANs and WLANs", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011.
- [3] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ y μ ", Soviet Physics Uspekhi, vol.10, no. 4, pp. 509-514, 1968.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin-wire structures", Journal of Physics: Condensed Matter, vol. 10, pp. 4785-4809, 1998.
- [5] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Physical Review Letters, vol.84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.
- [6] F. J. Herraiz-Martínez, "Metamaterial-Loaded Printed Antennas: Design and Applications", Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [7] Constantine A. Balanis, "Antenna theory", John Wiley & Sons
- [8] F. Aznar Ballesta, "Caracterización de nuevos resonadores metamaterial, líneas de transmisión artificiales y aplicaciones en el diseño de circuitos de comunicaciones", Universidad Autónoma de Barcelona, mayo 2009
- [9] F. J. Herraiz-Martínez, G. Zamora, F. Paredes, F. Martín, and J. Bonache, "Dual-band printed dipole antenna loaded with open complementary split-ring resonators (OCSRRs) for wireless applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011.
- [10] F. J. Herraiz-Martínez, J. Montero-de-Paz, E. Ugarte, V. González-Posadas, L.E. García-Muñoz, D. Segovia Vargas, "Multifrequency self-diplexed single patch antennas loaded with Split Ring Resonators", Progress In Electromagnetics Research, 2011
- [11] Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, Miguel Ferrando Bataller, "Antenas", Ediciones UPC
- [12] Indrasen Singh, Vijay Shanker Tripathi, and Sudarshan Tiwari, "Dual-Band Microstrip Patch Antenna Miniaturization Using Metamaterial", Departament of Electronics and Communication Engineering, Motilal Nehru National Institute of Technology, Allahabad 211004, India.
- [13] N. Ortiz, F. Falcone, M. Sorolla, "Radiation Efficiency Improvement of Dual Band Patch Antenna Based on a Complementary Rectangular Split Ring Resonator", Millimeter Wave Laboratory Public University of Navarra.
- [14] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. Marqués, F. Falcone, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, J. García, I. Gil, M. Flores Portillo and M. Sorolla, "Equivalent circuit models for split ring resonators and complementary split ring resonators coupled to planar transmission lines", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.53, pp. 1451-1461, April 2005.